

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Química y Nuclear



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**Contribución a la generación de  
plasma frío mediante electrodos SMD  
y JET.**

**TESIS DOCTORAL**

**Presentada por:**

Guillermo Baeza Oliete.

**Dirigida por:**

Dr. Gumersindo Jesús Verdú Martín

Valencia, Mayo 2017



A mis hijos Lidia y Sergio, a mis padres y a mi amigo Rafa con el que empecé  
los cursos de doctorado.



## **Agradecimientos**

En primer lugar quiero agradecer especialmente este trabajo de tesis a Patricia, Belén, Daniel, José Ignacio y Xavier, Adoración y Jesús y al resto del personal de Titania, sin cuyo apoyo al proyecto y su ánimo en momentos difíciles no hubiese sido posible realizar esta tesis.

En segundo lugar quiero agradecer a Gumersindo Verdú, como director de la tesis, por estar pendiente de mí durante tantos y tantos años durante la elaboración de este trabajo.

En tercer lugar quiero agradecer a Rafael Romero su asesoramiento y consejo a la hora de interpretar los datos.

De manera más personal quisiera agradecer a mis hijos, padres, hermanos y a mis amigos el soporte y los ánimos que me han dado durante todo este tiempo.



## RESUMEN

La necesidad de descontaminar biológicamente material sensible o de esterilizar material en quirófanos, ha hecho durante años que se estudien diversas técnicas de descontaminación. Entre ellas surge una técnica relativamente nueva que es la posibilidad de descontaminar o esterilizar mediante plasma.

El plasma es conocido por ser el cuarto estado de la materia, y debido a que es un estado en el que están presentes electrones libres, iones, cationes y otras muchas especies reactivas, parece que puede ser un buen candidato para conseguir la esterilización y/o descontaminación de material biológico.

En la actualidad ya existen equipos que descontaminan mediante plasma pero estos equipos trabajan a bajas presiones y con pequeños volúmenes por la configuración de los electrodos y, en general, utilizan gases nobles o peróxido para producir el plasma por lo que hace que sea muy complicado su uso en campo.

En esta tesis se utilizan equipos de generación de plasma no térmico a presión atmosférica, en concreto dos sistemas diferentes: un sistema denominado cámara de plasma a presión atmosférica - Plasma no térmico o APPC-NTP (Atmospheric Pressure Plasma Chamber - No Thermal Plasma) y otro sistema denominado Jet de plasma a presión atmosférica – Plasma no térmico o APPJ-NTP (Atmospheric-Pressure Plasma Jet - No Thermal Plasma). Ambos sistemas se caracterizan por usar aire puro como gas para la producción de plasma, trabajar a presión atmosférica y producir plasma a temperatura ambiente, lo que los convierte en candidatos perfectos para poder ser utilizados de forma económica en multitud de situaciones, incluso en campo, y de poder ser usados en la descontaminación de material sensible.

El objetivo de esta tesis es única y exclusivamente tratar de establecer, en caso de existir, correlaciones entre variables independientes de entrada al sistema y variables dependientes o de salida del sistema a fin de entender el comportamiento del plasma generado en las condiciones explicadas en el párrafo anterior.

Si bien es verdad que existen dos sistemas diferentes el APPC-NTP y el APPJ-NTP, el primero se ha dividido en dos durante el desarrollo de la tesis debido a

que se han utilizado dos amplificadores de voltaje totalmente diferentes, por lo que las variables estudiadas tanto de entrada como de salida han sido distintas.

El trabajo de esta tesis ha concluido con el establecimiento de las correlaciones obtenidas entre las variables de entrada y de salida dejando abierta la posibilidad de estudiar el comportamiento de estas en relación a la eficiencia de descontaminación biológica o la esterilización

## ABSTRACT

The great need to sterilize biologically sensitive or sterile material in operating theatres, has been given great importance for years. Among the various decontamination techniques being studied, there is a relatively new technique that involves using plasma for the process of decontaminating and sterilizing operating theatres.

Plasma is known as the fourth State of matter, and holds the properties of free electrons, ions and cations, as well as other reactive species. This makes it a good candidate for the sterilization and/or decontamination of biological material.

Nowadays, the use of plasma is being used with equipment that serves in the process of decontamination. Yet, this equipment at present, is working with low pressure and small volumes, based on the configuration of the electrodes. Generally, noble gases or peroxide are used to produce plasma, which makes it very difficult to use in the field.

This thesis requires atmospheric pressure and non-thermal plasma generation equipment. In particular, a system called Atmospheric Pressure Plasma Chamber - No Thermal Plasma (APPC-NTP) and another system called Atmospheric-Pressure Plasma Jet - No Thermal Plasma (APPJ-NTP), which are based on two different systems.

Both systems are characterized by the use of pure air as gas for the production of plasma. They work at atmospheric pressure and produce plasma at room temperature, which makes them perfect candidates to be used cost-effectively in many situations, even in the field, and can be used in the decontamination of sensitive material.

The objective of this thesis is to investigate and establish a correlation if any, between independent variables entering the system, and dependent variables, or output of the system. This, in order to understand the behaviour of the plasma generated in the conditions, explained in the previous paragraph.

While it is true that there are two different systems, the APPC-NTP and APPJ-NTP, the first has been divided into two, during the development of this thesis. Because two completely different voltage amplifiers have been used, the variables which have been studied, both input and output, have given different results.

In conclusion, the work which has been done for this thesis, has established the correlation between the variables of entry and exit. Thus, leaving open the possibility of studying the behaviour of these, in relation to the efficiency of biological decontamination or sterilization.

## RESUM

La necessitat de descontaminar biològicament material sensible o d'esterilitzar material als quiròfans, ha fet al llarg d'anys que s'estudien diverses tècniques de descontaminació. D'aquestes en surt una tècnica relativament nova que consisteix en descontaminar o esterilitzar mitjançant plasma.

El plasma és conegut per ser el quart estat de la matèria, y i degut a que és un estat en el que estan presents electrons lliures, ions, cations i altres espècies reactives sembla que pot ser un bon candidat per a aconseguir l'esterilització i/o descontaminació de material biològic. Eixida del sistema amb l'objectiu d'entendre el comportament del plasma generat en les condicions.

A l'actualitat ja existeixen equips que descontaminen mitjançant plasma però aquests equips treballen a baixes pressions i amb xicotets volums per la configuració dels electrodes i que, en general, utilitzen gasos nobles o peròxid per a produir el plasma, aquestes raons fan que siga molt complicat el seu ús en camp.

A aquesta tesi s'utilitzaran equips de generació de plasma no tèrmic a pressió atmosfèrica, en concret dos sistemes diferents, un sistema anomenat càmera de plasma a pressió atmosfèrica-Plasma no tèrmic o APPC-NTP (Atmospheric Pressure Plasma Chamber - No Thermal Plasma) i altre sistema anomenat Jet de plasma a pressió atmosfèrica – Plasma no tèrmic o APPJ-NTP (Atmospheric-Pressure Plasma Jet - No Thermal Plasma). Tots dos sistemes es caracteritzen per l'ús d'aire pur com a gas per a la producció de plasma, treballar a pressió atmosfèrica i produir plasma a temperatura ambient, i per tant els converteix en candidats perfectes per a poder ser utilitzats de forma econòmica en multitud de situacions, inclòs en camp i de poder ser usats en la descontaminació de material sensible.

L'objectiu d'aquesta tesi és única i exclusivament tractar d'establir, en cas d'existir, correlacions entre variables independents d'entrada al sistema i variables dependents o d'eixida del sistema amb la finalitat d'entendre el comportament del plasma generat en les condicions exposades al paràgraf anterior.

Malgrat que existeixen dos sistemes diferents, el APPC-NTP i el APPJ-NTP, el primer s'ha dividit en dos al llarg del desenvolupament de la tesi degut a que

s'han utilitzat dos amplificadors de voltatge totalment diferents, pel que les variables estudiades, tant d'entrada com d'eixida, han estat diferents.

El treball de la tesi ha conclòs amb l'establiment de les correlacions obtingudes entre les variables d'entrada i d'eixida deixant oberta la possibilitat d'estudiar el comportament d'aquestes en relació a l'eficiència de descontaminació biològica o l'esterilització.

---

# Índice

Resumen.....	i
Abstract.....	iii
Resum.....	v
Índice.....	1
Índice de figuras.....	7
Índice de tablas.....	11
Siglas.....	15
Capítulo 1: Introducción.....	17
1.1. Motivación.....	17
1.2. Objetivos.....	17
1.3. Marco de la tesis.....	18
1.4. Estructura de la tesis.....	19
Capítulo 2: Estado del arte.....	21
2.1. ¿Qué es el plasma?.....	21
2.2. Clasificación general del plasma.....	22
2.3. Clasificación del plasma NTP.....	24
2.3.1. Plasmas a baja presión.....	24
2.3.2. Plasma a presión atmosférica.....	24
Capítulo 3: Equipamiento para la generación de plasma.....	35

3.1.	Electrodos para la generación de plasma utilizados en la tesis .....	35
3.1.1.	Cámara con electrodos planos tipo SMD .....	36
3.1.2.	Jet de electrodos cilíndricos tipo DBD.....	43
3.2.	Generador de funciones.....	47
3.3.	Amplificador de alto Voltaje.....	53
3.4.	Sistema de gases.....	57
Capítulo 4:	Parámetros a medir.....	63
4.1.	Parámetros de entrada .....	63
4.1.1.	Parámetros de entrada del sistema APPC-NTP.....	64
4.1.2.	Parámetros de entrada del sistema APPJ-NTP.....	76
4.2.	Parámetros de salida.....	78
4.2.1.	Parámetros de salida del sistema APPC-NTP .....	78
4.2.2.	Parámetros de salida del sistema APPJ-NTP .....	89
Capítulo 5:	Metodología empleada .....	93
5.1.	Metodología empleada en la toma de datos. ....	93
5.1.1	Metodología empleada en la toma de datos del sistema APPC-NTP. .....	94
5.1.2.	Metodología empleada en la toma de datos del sistema APPJ-NTP. .....	96
5.2.	Metodología empleada en el análisis estadístico de datos.....	98
5.2.1.	Metodología empleada con los espectros: Análisis Factorial de Correlaciones.....	100
5.2.2.	Definición de variables de los sistemas de producción de plasma no térmico a presión atmosférica (APPC-NTP y APPJ-NTP) .....	101
5.3.	Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma.....	106
5.4.	Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma.....	107
5.4.1.	Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS	107

---

5.4.2.	Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 .....	107
5.4.3.	Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.	108
Capítulo 6:	Resultados .....	111
6.1.	Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS....	111
6.1.1.	La Intensidad de corriente .....	111
6.1.2.	La humedad final.....	112
6.1.3.	Temperatura de la muestra .....	113
6.1.4.	Temperatura de la cámara .....	114
6.1.5.	Espectro .....	114
6.2.	Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	120
6.2.1.	La humedad final.....	120
6.2.2.	Temperatura de la muestra .....	121
6.2.3.	Temperatura de la cámara .....	121
6.2.4.	Espectro.....	123
6.3.	Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	127
6.3.1.	La Intensidad de corriente .....	127
6.3.2.	Temperatura de la muestra .....	128
6.3.3.	Espectro.....	129
Capítulo 7:	Conclusiones .....	133
7.1.	Conclusiones .....	133
7.1.1.	Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS	133
7.1.2.	Sistema APPC-NTP con amplificador GBS Elektronik modelo Minipuls 4. ....	134
7.1.3.	Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.	135
7.2.	Líneas futuras de trabajo .....	136
Referencias.....		139

Apéndice I Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma.....	145
1 Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	146
2 Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 .....	147
3 Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	149
Apéndice II Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma.....	157
1 Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	158
2 Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 .....	174
3 Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	184
Apéndice III Estudio estadístico de los sistemas .....	261
1. Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	261
1.1. Intensidad .....	262
1.2. Humedad Final .....	264
1.3. Temperatura de la muestra .....	267
1.4. Temperatura de la cámara .....	269
1.5. Espectro.....	272
1.5.1. Resultados del Análisis Factorial de las variables del espectro...	272
1.5.2. Relación del factor del espectro con las condiciones operativas.	275
2. Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 .....	277
2.1. Humedad Final .....	278
2.2. Temperatura de la muestra .....	280
2.3. Temperatura de la cámara .....	283
2.4. Espectro.....	286
2.4.1. Resultados del Análisis Factorial de las variables del espectro...	286
2.4.2. Relación del factor del espectro con las condiciones operativas.	288

---

3.	Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	291
3.1.	Intensidad .....	292
3.2.	Temperatura de la muestra .....	295
3.3.	Espectro.....	298
3.3.1.	Resultados del Análisis Factorial de las variables del espectro...	298



## Índice de figuras

Figura 2.1 Esquema de descarga de corona.....	26
Figura 2.2 Esquema electrodo de descarga de corona.....	27
Figura 2.3 Esquema electrodo de micro-hueco. ....	28
Figura 2.4 Esquema electrodo de descarga de barrera dieléctrica.....	28
Figura 2.5 Esquemas electrodos de descarga de barrera. ....	30
Figura 2.6 Esquema electrodo APPJ. ....	31
Figura 2.7 Geometrías APPJ. ....	33
Figura 3.1 Configuración electrodos SMD .....	37
Figura 3.2 Dinámica del plasma en los electrodos SMD .....	37
Figura 3.3 Esquema de malla del electrodo de tierra .....	38
Figura 3.4 Electrodo y dieléctrico desarrollados en la tesis.....	39
Figura 3.5 Elementos con los electrodos ubicados en sus columnas.....	40
Figura 3.6 Rejilla portamuestras .....	42
Figura 3.7 Cámara. ....	43
Figura 3.8 Esquema APPJ-NTP. ....	44
Figura 3.9 Electrodo de potencia del APPJ-NTP.....	45
Figura 3.10 Tubo de cuarzo recubierto de grafito APPJ-NTP. ....	46
Figura 3.11 Electrodo de tierra. APPJ-NTP. ....	46
Figura 3.12 APPJ-NTP.....	47
Figura 3.13 Generador de funciones. ....	48
Figura 3.14 Amplificador de alto voltaje. ....	53
Figura 3.15 Amplificador de alto voltaje A-GBS minipuls 4.....	56
Figura 3.16 Sistema de gases. ....	58
Figura 3.17 Caudalímetro másico BRONKHORST HI-TEC F-201AV. ....	61
Figura 3.18 Controlador del mezclador de gases. BRONKHORST HI-TEC E-8103-2A-1A-0. ....	62
Figura 4.1 Osciloscopio Tektronix TDS 2024C.....	65
Figura 4.2 Sonda de Alta tensión Tektronix modelo P6015A.....	66
Figura 4.3 Curvas frecuencia/voltaje del Trek 10/10B-HS. ....	68
Figura 4.4 Sonda de humedad Vaisala HMP110.....	74
Figura 4.5 Detalle de colocación de sonda de humedad Vaisala HMP110 en el interior de la cámara .....	75
Figura 4.6 Imagen de generación de plasma en el sistema APPC-NTP.....	78
Figura 4.7 Espectrómetro Ocean Optics Maya 2000 Pro. ....	81

Figura 4.8 Detalle de colocación del coseno corrector del Espectrómetro Ocean Optics Maya 2000 Pro.....	82
Figura 4.9 Detalle de colocación del coseno corrector del Espectrómetro Ocean Optics Maya 2000 Pro.....	83
Figura 4.10 Espectro de emisión adquirido con el espectrómetro y el programa OceanView.....	83
Figura 4.11 Parámetros de los picos obtenidos con el programa OceanView...	84
Figura 4.12 Identificación de picos con el programa Plasus Specline. ....	85
Figura 4.13 Termómetro de infrarrojos Calex electronics modelo Pyromini C-151.....	86
Figura 4.14 Detalle de la sonda de temperatura de infrarrojos en el interior de la cámara .....	87
Figura 4.15 Ubicación de la sonda de temperatura de infrarrojos en el interior de la cámara. ....	88
Figura 4.16 Imagen de producción de plasma con el sistema APPJ-NTP .....	89
Figura 5.1 Monitorización del sistema APPC-NTP. ....	96
Figura 5.2 Monitorización del sistema APPJ-NTP. ....	98
Apéndice III. Figura 1 Gráfico de Intensidad. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	263
Apéndice III. Figura 2 Gráfico de residuos variable independiente Intensidad para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	264
Apéndice III. Figura 3 Gráfico de Humedad Final. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	266
Apéndice III. Figura 4. Gráfico de residuos variable independiente Humedad final para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS	266
Apéndice III. Figura 5 Gráfico de Temperatura muestra. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	268
Apéndice III. Figura 6 Gráfico de residuos variable independiente Temperatura muestra para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	269
Apéndice III. Figura 7 Gráfico de Temperatura cámara. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	271
Apéndice III. Figura 8 Gráfico de residuos variable independiente Temperatura cámara para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	272

---

Apéndice III. Figura 9 Varianza explicada por los factores para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	273
Apéndice III. Figura 10 Gráfico del Factor A del espectro. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	276
Apéndice III. Figura 11 Gráfico de residuos variable independiente Factor A del espectro para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	277
Apéndice III. Figura 12 Gráfico de Humedad Final. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	279
Apéndice III. Figura 13 Gráfico de residuos variable independiente Humedad final para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	279
Apéndice III. Figura 14 Gráfico de Temperatura muestra. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	282
Apéndice III. Figura 15 Gráfico de residuos variable independiente Temperatura muestra para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	283
Apéndice III. Figura 16 Gráfico de Temperatura de la cámara. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	285
Apéndice III. Figura 17 Gráfico de residuos variable independiente Temperatura de la cámara para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	285
Apéndice III. Figura 18 Varianza explicada por los factores para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.....	286
Apéndice III. Figura 19 Gráfico del Factor A del espectro. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	290
Apéndice III. Figura 20 Gráfico de residuos variable independiente Factor A del espectro para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	291
Apéndice III. Figura 21 Gráfico de Intensidad. Valor observado y valor predicho para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	294
Apéndice III. Figura 22 Gráfico de residuos variable independiente Intensidad para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	294

Apéndice III. Figura 23 Gráfico de Temperatura muestra. Valor observado y valor predicho para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	297
Apéndice III. Figura 24 Gráfico de residuos variable independiente temperatura muestra para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	297
Apéndice III. Figura 25 Varianza explicada por los factores para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS. ....	298
Apéndice III. Figura 26 Gráfico del Factor A del espectro. Valor observado y valor predicho para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	302
Apéndice III Figura 27 Gráfico de residuos variable independiente Factor A del espectro para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.4.....	303

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Propiedades plasma de equipos a presión atmosférica.....	26
Tabla 3.1 Características del generador de funciones Rigol modelo DG 5077.	53
Tabla 3.2 Características del amplificador de alto voltaje Trek modelo 10/10 B-HS.....	55
Tabla 3.3 Características de las placas amplificadoras de alto voltaje A-GBS minipuls 4.....	57
Tabla 3.4 Características del generador de aire Cero .....	59
Tabla 3.5 Características de las electroválvulas del mezclador de gases. ....	59
Tabla 3.6 Características de los filtros de partículas. ....	60
Tabla 3.7 Características de las válvulas manuales.....	60
Tabla 3.8 Características del control de caudal BRONKHORST hi-tec F-201AV-RAD-22-V.....	60
Tabla 3.9 Características del control de caudal BRONKHORST hi-tec F-201CV-RAD-22-V.....	61
Tabla 3.10 Características del controlador electrónico BRONKHORST HI-TEC E-8103-2A-1A-00. ....	62
Tabla 4.1 Características del osciloscopio Tektronic TDS 2024C.....	67
Tabla 4.2 Características de la sonda de alta tensión Tektronic P6015A.....	68
Tabla 4.3 Características técnicas del PTFE. ....	71
Tabla 4.4 Características de la sonda de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110 .....	75
Tabla 4.5 Especies relevantes en el plasma y sus longitudes de onda.....	80
Tabla 4.6 Características del espectrómetro Ocean Optics modelo Maya 2000 Pro .....	82
Tabla 4.7 Características del termómetro Calex modelo Pyromini-C-151 .....	87
Tabla 5.1 Longitudes de onda de los picos del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	107
Tabla 5.2 Longitudes de onda de los picos del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 .....	108
Tabla 5.3 Longitudes de onda de los picos del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	109
Tabla 6.1 Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	115

Tabla 6.2 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS. ....	117
Tabla 6.3 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda con especies reactiva del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	119
Tabla 6.4 Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	123
Tabla 6.5 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.....	124
Tabla 6.6 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda con especies reactiva del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4. ....	126
Tabla 6.7 Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	129
Tabla 6.8 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS. ....	130
Tabla 6.9 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda con especies reactiva del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	130
Apéndice I. Tabla I. Variables de entrada del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	147
Apéndice I. Tabla II. Variables de entrada del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.....	148
Apéndice I. Tabla III. Variables de entrada del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	156
Apéndice II. Tabla I: Variables de salida del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	173
Apéndice II. Tabla II Variables de salida del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.....	183
Apéndice II. Tabla III Variables de salida del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	259
Apéndice III. Tabla 1 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la intensidad para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	262
Apéndice III. Tabla 2. Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la humedad final para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	265

Apéndice III. Tabla 3 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la muestra para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	267
Apéndice III. Tabla 4. Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la cámara para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	270
Apéndice III. Tabla 5 Los Coeficientes de correlación del Factor A con las 24 variables primitivas del espectro para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	274
Apéndice III Tabla 6 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente Factor A para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	275
Apéndice III. Tabla 7 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la humedad final para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.....	278
Apéndice III. Tabla 8 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la humedad final añadiendo el Voltaje para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.....	280
Apéndice III. Tabla 9 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la muestra para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4....	281
Apéndice III Tabla 10 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la cámara para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4....	284
Apéndice III. Tabla 11 Los Coeficientes de correlación del Factor A con las 24 variables primitivas del espectro para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.....	287
Apéndice III. Tabla 12 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente Factor A para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 .....	289
Apéndice III. Tabla 13 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la intensidad de la cámara para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS .....	292
Apéndice III. Tabla 14 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la Temperatura muestra de la cámara para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.....	295

Apéndice III. Tabla 15 Los Coeficientes de correlación del Factor A con las 22 variables primitivas del espectro para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS ..... 299

Apéndice III. Tabla 16 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente Factor A para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS..... 301

---

**Siglas**

AC: Corriente alterna (Alternating Current).

APP: Plasma a presión atmosférica (Atmospheric Pressure Plasma).

APPC-NTP: Cámara de plasma a presión atmosférica - Plasma no térmico (Atmospheric Pressure Plasma Chamber - No Thermal Plasma).

ANTP: Plasma no térmico a presión atmosférica (Atmospheric No Thermal Plasma).

APPJ-NTP: Jet de plasma a presión atmosférica – Plasma no térmico. . (Atmospheric-Pressure Plasma Jet - No Thermal Plasma).

BNC: Bayonet Neill-Concelman

DBD: Descarga de barrera dieléctrica (Dielectric Barrier Discharge).

DC: Corriente continua (Direct Current).

DFE: Electrodo libre de dieléctrico (Dielectric Free Electrode).

FPGA: Tecnología de arreglo de compuertas programables en campo (Field Programmable Gate Array).

FWHM: Anchura a media altura (Full Width at Half Maximum).

FWQM: Anchura a un cuarto de altura máxima (Full Width at Quarter Maximum)

HCD: Descarga de cátodo hueco (Hole Cathode Discharge).

HV: Alto voltaje (High Voltage).

LPP: Plasma a baja presión (Low Pressure Plasma)

LTE: Equilibrio térmico local (Local Thermal Equilibrium).

MHCD: Descarga de cátodo de micro-agujero (Microhollow Cathode Discharge).

$n_e$  = densidad de electrones.

NOS: Especies de nitrógeno y oxígeno (Oxygen and Nitrogen Species).

NTP: Plasma no térmico (No Thermal Plasma).

OAUGDP: Plasma de descarga de incandescencia en una atmósfera uniforme (One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma).

OES: Espectro óptico de emisión. (Optical Emission Spectrum).

OAS: Espectro óptico de absorción. (Optical Absorption Spectrum).

PTFE: Politetrafluoretileno.

SMD: Micro-descarga superficial (Surface Micro-Discharge).

RF: Radio Frecuencia (Radio Frequency).

RNS: Especies reactivas del nitrógeno (Reactive Nitrogen Species).

ROS: Especies reactivas del oxígeno (Reactive Oxygen Species).

$T_e$  = Temperatura electrones.

$T_i$  = Temperatura iones.

$T_g$  = Temperatura gas.

$T_p$  = Temperatura plasmas.

TP: Plasma térmico. (Thermal Plasma).

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1. Motivación.

Esta tesis surge a partir de la colaboración con diversos colectivos preocupados por la descontaminación biológica de tejidos vivos y materiales especialmente sensibles.

Después de investigar cuáles son las técnicas empleadas en la actualidad, calor seco, calor húmedo, radiación ultravioleta, peróxido de hidrógeno o líquidos con diversas composiciones químicas, y constatar que ninguna de estas se pueden aplicar sobre tejidos vivos o materiales especialmente sensible, se pone el punto de mira en una tecnología en desarrollo “el plasma frío a presión atmosférica” como posible candidata para la descontaminación biológica de tejidos vivos y material especialmente sensible.

## 1.2. Objetivos

En esta tesis no se va a analizar ni la capacidad de descontaminación bacteriológica de esta técnica ni la posibilidad de aplicación sobre tejido vivo o material especialmente sensible (durante el desarrollo de esta tesis denominaremos como material especialmente sensible a aquel material médico, electrónico o de cualquier otra índole que se pueda dañar estructural o funcionalmente al tratar de ser descontaminado, esterilizado o desinfectado mediante calor, productos químicos o productos en base acuosa). El objetivo principal de esta tesis es la obtención de correlaciones entre variables de entrada de equipos de

producción de plasma con las variables de salida de éste, con el fin de obtener un mejor conocimiento del plasma y de poder predecir su comportamiento y su posible aplicación o no sobre tejidos vivos y material especialmente sensible.

Como objetivos específicos se trata de obtener la correlación para dos generadores de plasma uno tipo SMD o de micro-descarga superficial (Surface micro-discharge), y otro tipo DBD o de descarga de barrera dieléctrica (Dielectric Barrier Discharge) siendo este DBD de tipo jet entre los siguientes parámetros de entrada del sistema generador del plasma con los siguientes parámetros de salida del plasma.

- Parámetros de entrada:
  - Voltaje.
  - Frecuencia.
  - Amperaje (pese a ser una variable de entrada será tratada como variable independiente al no poderse fijar su valor).
  - Tipo de gas
  - Humedad del gas.
  - Caudal.
- Parámetros de salida:
  - Especies reactivas producidas.
  - Temperatura de superficies expuestas.
  - Humedad al finalizar la exposición a plasma

### **1.3. Marco de la tesis**

En diciembre del 2011, el autor de esta tesis estaba trabajando en el Centro de Investigación Príncipe Felipe.

Debido al cargo que ocupaba en dicho Centro (Jefe de Protección Radiológica), el autor interaccionó con los responsables de los diversos departamentos que lo componen (animalario, prevención laboral), y los diversos grupos de investigación biomédica de forma que durante su trabajo en el Centro de Investigación Príncipe Felipe adquirió conocimientos sobre una variedad de temas y las diferentes problemáticas existentes en dicho centro. Fijándose principalmente en los temas que tienen relación con los laboratorios bajo su responsabilidad como son las contaminaciones biológicas cruzadas.

Al mismo tiempo impulsó diversas colaboraciones con otras organizaciones como con el Regimiento NBQR-1 de Valencia y la UPV.

Con el fin de encontrar un proyecto que poder ofrecer a empresas interesadas en la descontaminación y tras diversas colaboraciones personales con el Regimiento NBQR-1 de Valencia, y en base a los conocimientos adquiridos el autor de esta tesis en enero de 2012 empezó la investigación de métodos de descontaminación bacteriológica sobre superficies, tejidos vivos y material sensible. Del análisis de las diferentes tecnologías existentes y de las tecnologías en desarrollo surge este trabajo de investigación.

#### **1.4. Estructura de la tesis**

La presente tesis se divide en los siguientes 7 capítulos y 3 apéndices:

- Capítulo 1: Introducción.

En este capítulo se presenta la motivación, los objetivos usados y el marco en el que se encuadra esta tesis, así como un pequeño resumen de los capítulos que la componen.

- Capítulo 2: Estado del arte.

Se define el concepto de plasma y sus tipos y se realiza una revisión del estado del arte en el que se encuentra la tecnología del plasma.

- Capítulo 3: Equipamiento.

Se justifica el uso del equipamiento utilizado en esta tesis y se definen sus principales características, se distingue entre el sistema APPC-NTP o cámara de plasma a presión atmosférica - plasma no térmico (Atmospheric Pressure Plasma Chamber - No Thermal Plasma) y el sistema APPJ-NTP o jet de plasma a presión atmosférica - Plasma no térmico (Atmospheric Pressure Plasma Jet - No Thermal Plasma) debido al uso de distinto equipamiento.

- Capítulo 4: Parámetros a medir.

Se justifican los parámetros a medir, describiendo su importancia en la producción del plasma y se definen en el marco de esta tesis. Se distingue entre el sistema APPC-NTP y el sistema APPJ-NTP. Se describe además con sus principales características los equipos utilizados en su medida.

- Capítulo 5: Metodología.

Se define la metodología empleada tanto en la adquisición de datos como en el análisis de estos.

- Capítulo 6: Resultados.

Se plasman los resultados obtenidos en la tesis y las correlaciones existentes entre las diferentes variables de entrada y de salida para los distintos sistemas de generación de plasma.

- Capítulo 7: Conclusiones.

Se analizan las conclusiones de los resultados.

- Apéndice I: Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma.

Se presentan las tablas con los valores de las variables de entrada de los sistemas de generación de plasma.

- Apéndice II: Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma.

Se presentan las tablas con los valores de las variables de salida de los sistemas de generación de plasma.

- Apéndice III: Estudio estadístico de los sistemas.

Se realiza el estudio estadístico de las variables de cada uno de los sistemas de generación de plasma.

# Capítulo 2:

## Estado del arte

### 2.1. ¿Qué es el plasma?

A temperaturas cercanas o superiores a energías de ionización atómica, los átomos se descomponen en electrones cargados negativamente y en iones con carga positiva. Estas partículas cargadas no son libres, de hecho se ven fuertemente afectadas por los campos electromagnéticos de las demás. Sin embargo, debido a que las cargas ya no están fuertemente ligadas, su conjunto se vuelve capaz de realizar movimientos colectivos de gran vigor y complejidad. Tal conjunto se denomina **plasma** (Fitzpatrick, 2014).

Debido a que por efecto térmico se rompen los enlaces interatómicos antes de producirse la ionización, la mayoría de plasmas terrestres comienzan como gases. De hecho, un plasma a veces se define como un gas que se ioniza suficientemente para mostrar un comportamiento similar al plasma. Hay que tener en cuenta que el comportamiento similar al plasma se produce después de que una muy pequeña fracción del gas haya sido objeto de ionización. De este modo los gases, fraccionadamente ionizados exhiben la mayor parte de las características de los fenómenos exóticos de los gases totalmente ionizados (Fitzpatrick, 2014). El término “plasma” usado para nombrar un gas ionizado fue introducido por primera vez por Irving Langmuir en 1927 (Mott-Smith, 1971).

El plasma es habitualmente conocido como cuarto estado de la materia y compone el 99% de la materia del universo.

Los plasmas resultantes de la ionización de gases neutros generalmente contienen el mismo número de portadores de carga positivos que negativos

por lo que a escala macroscópica las cargas positivas y negativas se neutralizan. Por lo que se les conoce cuasi-neutros (el término “cuasi se refiere a que pequeñas desviaciones de la neutralidad exacta tienen importantes consecuencias dinámicas para ciertos tipos de modo de plasma) (Fitzpatrick, 2014).

Luego, el plasma básicamente es un gas altamente ionizado compuesto por electrones libres, iones positivos y negativos, radicales libres, átomos y moléculas en estado fundamental y excitado y otras especies excitadas.

En el universo existen diferentes ejemplos de plasma como son la corona solar, el viento solar, las nebulosas, la ionosfera de la tierra y existen fenómenos terrestres que son producidos por plasma como es la aurora boreal. También se producen en relámpagos, en lámparas fluorescentes, en una gran variedad de experimentos de laboratorio y en procesos industriales. De hecho los plasmas producidos por descarga luminiscente se han convertido en el pilar de la industria de fabricación de semiconductores. Una aplicación doméstica del plasma son los conocidos televisores de plasma.

## 2.2. Clasificación general del plasma

Existen diferentes clasificaciones del plasma, una de las más habituales es una clasificación inicial en dos categorías (Nehra et al., 2008):

- a. Plasmas a alta temperatura o temperatura de fusión.
- b. Plasmas a baja temperatura
  - a. *Plasmas a alta temperatura o temperatura de fusión*

Son plasmas térmicos (TP: Thermal plasma) a alta temperatura o temperatura de fusión. La alta temperatura implica que todas las especies (electrones, iones y especies neutras) se encuentran en estado de equilibrio térmico. Como ejemplo de este tipo de plasma tenemos el plasma de fusión láser.

Las características principales de estos plasmas son que las temperaturas son muy altas y la densidad de electrones también:

- $T_e \approx T_i \approx T_g \approx T_p = 10^6\text{-}10^8 \text{ K}.$
- $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$

### b. *Plasmas a baja temperatura*

Dentro de estos podemos encontrar dos subtipos de plasmas:

- Plasmas térmicos (TP) a bajas temperaturas, también llamados plasmas en cuasi-equilibrio, que están en un estado de equilibrio térmico local (LTE: Local Thermal Equilibrium). Como ejemplo de estos plasmas tenemos los de arco, antorcha, y radio frecuencia (RF: Radio Frequency).

Las características principales de estos plasmas son que las temperaturas son del orden de decenas de miles de grados Kelvin y la densidad de electrones es muy elevada:

- $T_e \approx T_i \approx T_g \leq 2 \times 10^4 \text{ K}$
- $n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$

- Los plasmas no térmicos (NTP: No Thermal plasma) también llamados plasmas de no equilibrio o plasmas fríos. Como ejemplos de este plasma tenemos los jets de plasma a presión atmosférica (APPJ: Atmospheric Pressure Plasma Jet), los de descarga de barrera dieléctrica (DBD: Dielectric Barrier Discharge), los de descarga de cátodo de microagujero (MHCD: Microhollow Cathode Discharge), las nebulosas de plasma, los plasmas de descarga de incandescencia en una atmósfera uniforme (OAUGDP: One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma), los de corona y los de incandescencia.

Las características principales de estos plasmas son que las temperaturas son del orden de mil grados Kelvin o menos y la densidad de electrones es elevada:

- $T_e \gg T_i \approx T_g \leq 300-10^3 \text{ K}$
- $n_e \geq 10^{10} \text{ m}^{-3}$

Los TP se caracterizan por tener un equilibrio o cerca de éste entre electrones, iones y los componentes neutros, mientras que los plasma fríos o NTP se caracterizan porque casi toda la energía se la llevan los electrones y por lo tanto casi toda la temperatura, de forma que los iones y los componentes neutros del plasma permanecen a temperatura ambiente.

### **2.3. Clasificación del plasma NTP**

Dentro del plasma NTP, nos encontramos dos grandes grupos, los plasmas a baja presión (LPP: Low Pressure Plasma) y los plasmas a presión atmosférica (APP: Atmospheric Pressure Plasma).

#### **2.3.1. Plasmas a baja presión**

Estos plasmas se caracterizan por producirse en el interior de cámaras especiales en las que se realiza el vacío a una presión que va de  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  kPa ( $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  mbar) (Tendero et al., 2006).

La forma que tienen de operar es la siguiente:

Se realiza el vacío hasta alcanzar una presión de aproximadamente 0.1 mbar. Se inyecta el gas seleccionado (por ejemplo Oxígeno, Helio, Argón, Peróxido de hidrógeno gas) hasta tener una presión de trabajo que va de 0.1 mbar a 1 mbar. Cuando se alcanza la presión de trabajo se conecta el generador, y el gas de la cámara se empieza a ionizar. La cámara de vacío recibe continuamente gas por lo que se produce una continua renovación del gas del interior de la cámara (Diener Plasma Surface Technology, 2007).

Los volúmenes de estas cámaras van desde 1 a 50 litros para laboratorios hasta 10.000 litros o más para instalaciones industriales (Diener Plasma Surface Technology, 2007).

Estas máquinas son muy complejas y caras debido al sistema de vacío y si es verdad que tienen aplicación en esterilización de material médico, no permiten ni el trabajo en vivo ni el tratamiento de grandes superficies o de grandes equipos especialmente sensibles.

#### **2.3.2. Plasma a presión atmosférica**

Los equipos que producen este plasma trabajan a presión atmosférica lo que simplifica enormemente el equipo y abarata tanto los costes de producción del plasma como los costes de mantenimiento, además permiten trabajar con tejidos vivos “in situ” y con material especialmente sensible que luego van a ser el objeto de esta tesis.

Debido a que los equipos de esta tesis son de este tipo vamos a desarrollarlos en profundidad.

Uno de los parámetros en los que se puede clasificar los plasmas a presión atmosférica es por su frecuencia de excitación. En función de este parámetro tenemos tres grupos claramente diferenciados (Tendero et al., 2006):

1. Los de corriente directa (DC: Direct Current) y de bajas frecuencias de descarga. Las frecuencias están por debajo de 1 MHz (los equipos estudiados en esta tesis corresponden a este grupo).
2. Los plasmas iniciados por ondas de radio frecuencia. Las frecuencias van de 1 MHz a 1 GHz
3. Los plasmas de descargas de microondas. Las frecuencias están por encima de 1 GHz. (Kuo et al., 2004), (Lai et al., 2005).

Centrándonos en el grupo de los de DC y de descarga de baja frecuencia, en función del diseño pueden trabajar en modo continuo o pulsado.

El modo de funcionamiento por impulsos permite la inyección de grandes cantidades de energía en la descarga. Por otro lado, una fuente de alimentación pulsada es técnicamente más compleja que una fuente de DC y compromete la reproducibilidad del proceso (Tendero et al., 2006). En nuestro caso trabajaremos en modo continuo.

Dentro de los plasmas NTP a presión atmosférica cabe destacar en función de cómo se produce la descarga eléctrica los siguientes: de descarga de corona, descarga de cátodo de micro agujero, jet de plasma a presión atmosférica, de arco de descarga, de descarga luminiscente uniforme, de descarga de barrera dieléctrica y plasmas de aguja. Las características de las fuentes de plasma en término de las propiedades del plasma se pueden ver en la tabla 2.1. (Nehra et al., 2008).

<b>Parámetros</b>	<b>Descarga de corona</b>	<b>DBD</b>	<b>APPJ</b>	<b>Luminiscencia atmosférica MHCD</b>
<b>Método y tipo</b>	Electrodo de punta afiliada	Cubierta de barrera dieléctrica en electrodos	Capacidad de RF acoplada	DC luminiscente con el cátodo de micro agujero
<b>Excitación</b>	Pulsada.	AC o RF	RF 13.5 MHz	DC

	DC.			
<b>Presión (bar)</b>	1	1	1	1
<b>Energía de los electrones (eV)</b>	5 variable	1-10	1-2	.....
<b>Densidad electrones, cm<sup>-3</sup></b>	10 <sup>9</sup> -10 <sup>13</sup> variable	≈ 10 <sup>12</sup> -10 <sup>15</sup>	10 <sup>11</sup> -10 <sup>12</sup>	.....
<b>Voltaje de ruptura (kV)</b>	10-50	5-25	0.05-0.2	.....
<b>Escalabilidad y flexibilidad</b>	No	Sí	Sí	Sí
<b>Temperatura T<sub>máx</sub> T(K)</b>	Ambiente	Media del Gas. 300	400	2000
<b>Gas</b>	.....	N <sub>2</sub> <sup>+</sup> O <sub>2</sub> <sup>+</sup> NO <sup>+</sup> Raros gas/Raros Gases haluros	Helio, argón	Raros gas/Raros Gases haluros

**Tabla 2.1** Propiedades plasma de equipos a presión atmosférica

Veamos alguno de los tipos de descarga para generar plasma a presión atmosférica:

*a. Descarga de corona*

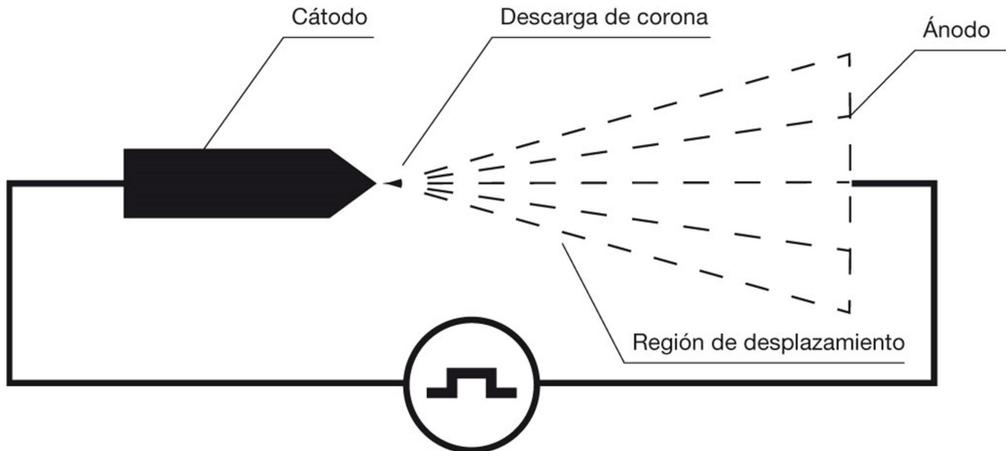


**Figura 2.1** Esquema de descarga de corona.

El primer esquema que se usó para generar plasma no térmico a presión atmosférica fue el de descarga de corona (figura 2.1 (Wagner et al., 2011)). Este tipo de fuente de plasma puede obtenerse de varias formas, en función de la polaridad del campo eléctrico y de la configuración geométrica de los electrodos.

Este tipo de descargas es característico de un par de electrodos asimétricos y se produce como resultado del campo eléctrico que rodea disposiciones no homogéneas de electrodos (como por ejemplo un electrodo tipo alambre y otro tipo plano) por un voltaje

de DC pulsada o continua. En un campo eléctrico no uniforme, la alta tensión en las proximidades de dichos electrodos supera con creces la fuerza de disociación del gas y se crea un plasma débilmente ionizado. Las coronas son pues, descargas no uniformes que se desarrollan en la región alta del campo cerca del electrodo agudo extendiéndose hacia el electrodo plano. Este fenómeno de rotura local se llama descarga de corona (Moeller et al., 2002), (Li et al., 2014). En la siguiente figura se puede ver un esquema de un equipo de generación de plasma con configuración corona tipo punto plano. La corona es positiva cuando el electrodo con la curvatura más fuerte está conectada al positivo de la fuente de alimentación y es una corona negativa cuando este electrodo se conecta al terminal negativo de la fuente de alimentación (Nehra et al., 2008). En la figura 2.2 (Nehra et al., 2008) se muestra un esquema de un electrodo de descarga de corona.



**Figura 2.2** Esquema electrodo de descarga de corona.

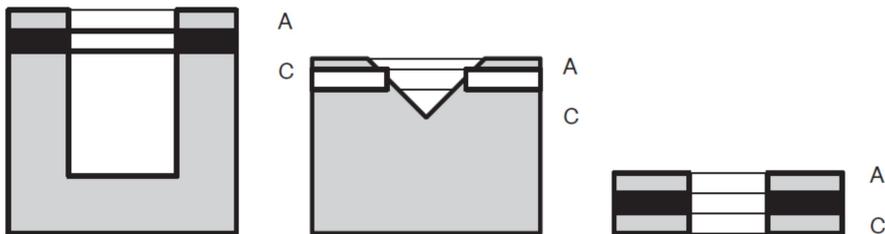
*b. Cátodos de descarga de micro-hueco*

Esta forma de producción de Plasma no térmico a presión atmosférica denominados ANTP (Atmospheric No Thermal Plasma) se basa en el uso de electrodos con cátodo de micro-huecos. La idea general es que en la descarga lineal la modificación de las formas de los cátodos conlleva un incremento en varios órdenes de magnitud de la densidad de corriente en comparación con la descarga lineal sin esta modificación. Esta clase de descargas con el cátodo modificado se conoce como descarga de cátodo hueco (HCD: Hole Cathode Discharge). El HCD consiste en un cátodo, que contiene alguna clase de agujero, cavidad o hueco cilíndrico, un

segmento esférico o simplemente un par de placas planas paralelas, y un ánodo conformado arbitrariamente. El efecto del cátodo hueco fue originalmente empleado como una fuente gaseosa de corriente de alta densidad de electrones a baja presión con el fin de formar unos interruptores de pseudo-chispa de alta energía (Nehra et al., 2008).

La alta presión de operación de los HCD se puede conseguir reduciendo el diámetro del agujero a valores de unas pocas decenas de micrómetros, por lo que el plasma se puede producir a presiones atmosféricas por el efecto de cavidad del cátodo. Para las descargas a presión atmosférica en cátodos de cavidad, el diámetro típico de la cavidad debe de encontrarse en el rango de micrómetro y por lo tanto surge el término de descarga de cátodo de micro-cavidad debido al pequeño tamaño de apertura requerido para que opere a alta presión (Zhu et al., 2012).

En la figura 2.3 (Nehra et al., 2008), se puede ver un esquema de este tipo de electrodo



**Figura 2.3** Esquema electrodo de micro-hueco.

*c. Descargas de barrera dieléctrica*



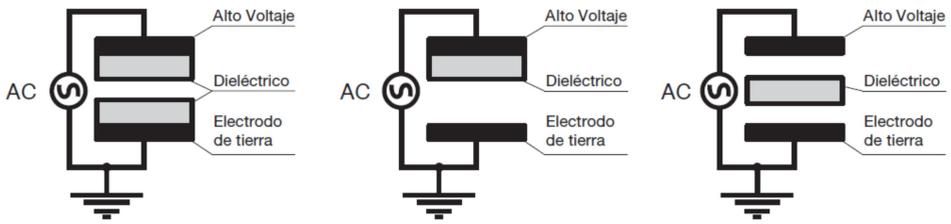
**Figura 2.4** Esquema electrodo de descarga de barrera dieléctrica.

Los equipos generadores de plasma de barrera dieléctrica (DBD) también llamados simplemente de descarga de barrera o descarga silenciosa son un tipo específico de descarga de corriente alterna

(AC: Alternating Current), la cual produce plasma en no equilibrio a presión atmosférica. En la figura 2.4 (Wagner et al., 2011) se puede ver un esquema de este tipo de electrodo. Esta descarga se produce con una disposición consistente en dos electrodos, uno de los cuales está cubierto con una capa dieléctrica colocado en el trayecto de la corriente entre los electrodos metálicos. La presencia de una o más capas de aislante en o entre los electrodos de potencia es una manera fácil para crear una descarga en no equilibrio a presión atmosférica. Debido a la presencia del acoplamiento capacitivo son necesarias tensiones variables en el tiempo para llegar a una DBD. Una de las mayores diferencias entre la descarga clásica y la DBD es que en la descarga clásica, los electrodos están en contacto directo con el gas de descarga y el plasma, por lo que durante el proceso de descarga se produce la corrosión del electrodo. Por el contrario en las DBDs, el electrodo y la descarga están separados por la barrera dieléctrica lo cual elimina la corrosión del electrodo cubierto. Otra diferencia fundamental es que la DBD no puede operar con voltajes DC debido a que el acoplamiento capacitivo dieléctrico requiere voltaje alterno para conducir a un desplazamiento de la corriente. En DBD se aplica un voltaje AC con una amplitud de 1 a 100 kV y una frecuencia que va de los kHz a los MHz (Kogelschatz, 2000), (Nehra et al., 2008).

Algunas configuraciones de estos generadores de plasma se pueden ver en la figura 2.5 (Nehra et al., 2008).

Disposiciones planares



Disposiciones cilíndricas

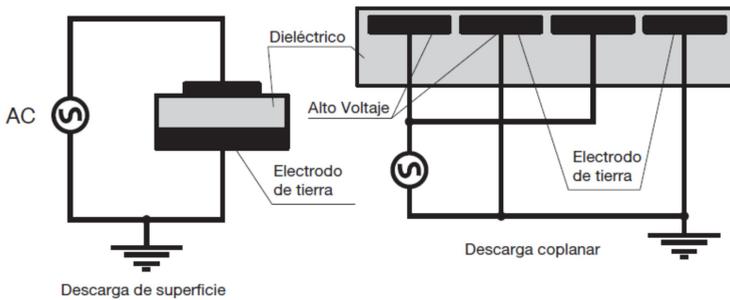
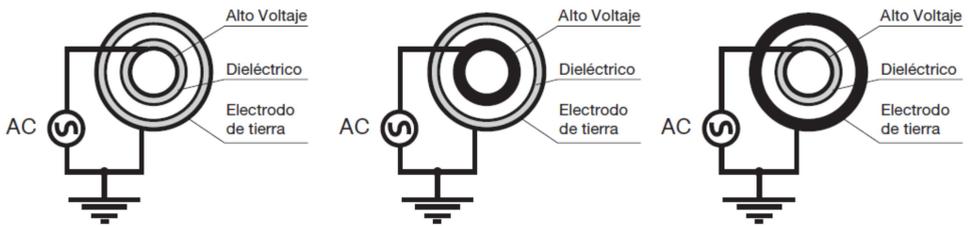


Figura 2.5 Esquemas electrodos de descarga de barrera.

Los volúmenes donde se produce la descarga pueden tener configuración planar o coaxial. En las disposiciones de electrodos planares, los dos electrodos son paralelos entre sí y las barreras dieléctricas, una o dos, se pueden tener en diferentes localizaciones; (i) en el electrodo con tensión o en el electrodo de tierra; (ii) en ambos electrodos; (iii) en el espacio entre los electrodos se interponen una o dos barreras dieléctricas entre ellos. En la configuración coaxial un electrodo se sitúa en el interior del otro y en el volumen intermedio se sitúan una o dos barreras dieléctricas con las siguiente configuraciones; (i) en el lado exterior del electrodo interior / en el lado interior del electrodo exterior; (ii) en ambos electrodos en las caras enfrentadas; (iii) entre los dos

electrodos cilíndricos. Además de estas configuraciones existen otros diseños que usan geometrías de descarga superficiales o coplanares. Los dispositivos de descarga superficial tienen un electrodo delgado y largo cubierto por una superficie dieléctrica en toda su longitud que se extiende hasta el otro electrodo. En esta configuración el espacio de descarga no está perfectamente definido por lo que la descarga se propaga a lo largo de la superficie del dieléctrico (Nehra et al., 2008).

Existen también combinaciones de configuración y volumen de descarga superficial, como son la configuración coplanar, como tal se usan en los paneles de plasma de televisión. El dispositivo descarga coplanar se caracteriza por tener pares de electrodos paralelos con polaridad opuesta, que están embebidos dentro de un dieléctrico de mayor tamaño, dichos electrodos se sitúan cerca de la superficie del dieléctrico. Además de estas configuraciones se usan otras variantes de DBD en diversas aplicaciones. Los DBD pueden mostrar dos modelos de descarga mayoritarios, el modelo de filamento, en el cual la forma común de la descarga se compone de varias micro-descargas que se distribuyen aleatoriamente sobre la superficie del electrodo, o el modo de descarga de luminiscencia homogénea, también conocida como descarga luminiscente a presión atmosférica debido a la similitud con la descarga luminiscente de DC (Nehra et al., 2008).

*d. Chorro de plasma a presión atmosférica (APPJ)*



**Figura 2.6 Esquema electrodo APPJ.**

Otra clase de descargas posibles para generar plasmas atmosféricos no térmicos son los jet de plasma a presión atmosférica. Se puede ver el esquema de este tipo de electrodo en la figura 2.6 (Wagner et al., 2011). Inicialmente el APPJ fue desarrollado por Jeong (de la Universidad de California, los Ángeles) en colaboración con Park (del Laboratorio nacional de Los Álamos) (Schütze et al., 1998) (Herrmann et al., 1999) (Herrmann, et al. 2002) estos consistían en dos electrodos concéntricos a través de los cuales hicieron fluir una

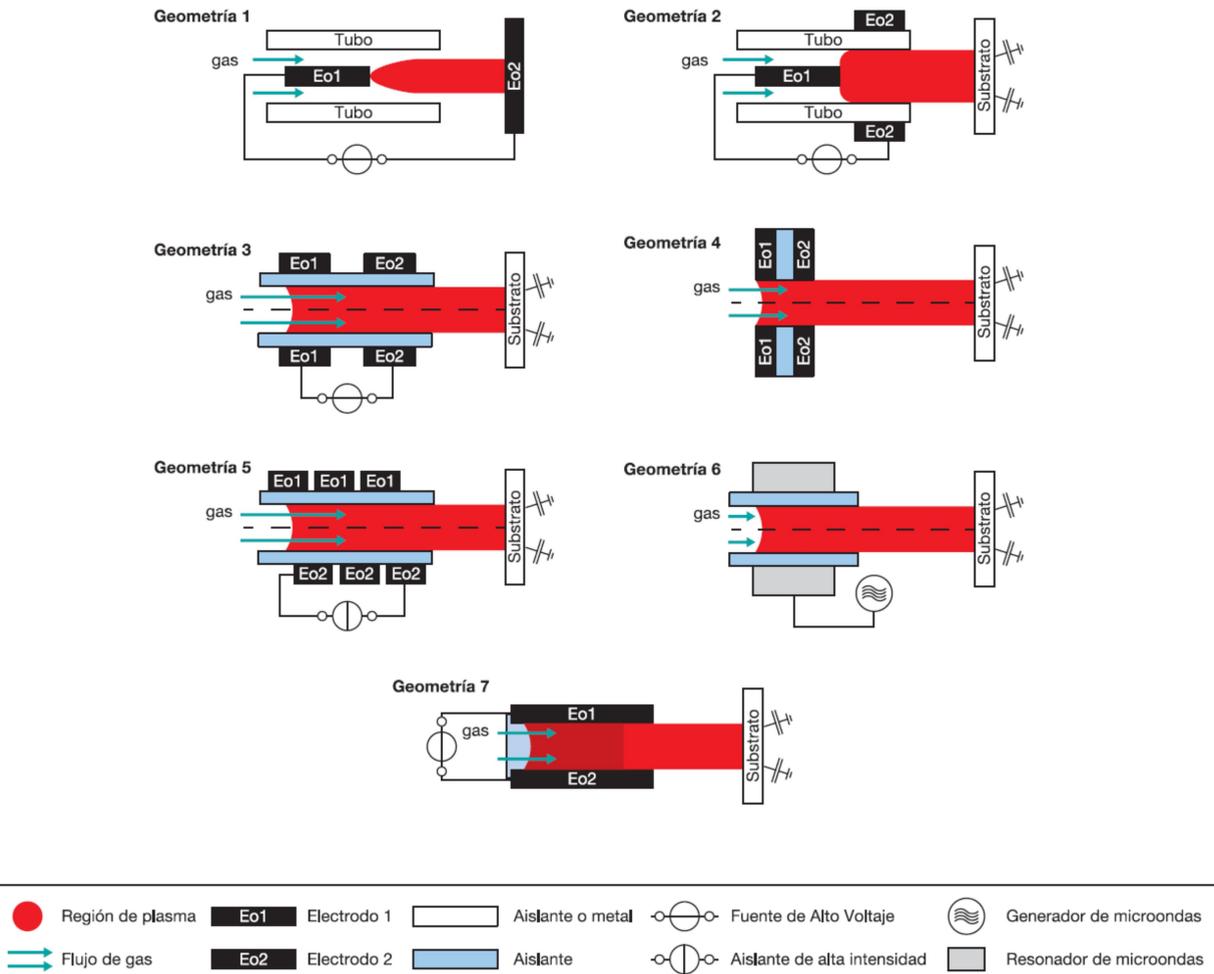
mezcla de helio, oxígeno u otros gases. En esta configuración, el electrodo interno lo acoplaron a una alimentación de radio frecuencia de 13.56 MHz y a un voltaje entre 100 y 250 V, el electrodo externo lo acoplaron a tierra. Al aplicar la alimentación de RF, comienza la descarga y actúa sobre el gas de alimentación, el cual fluye entre el electrodo cilíndrico externo conectado a tierra y el electrodo central y produce una corriente de gran velocidad de efluente de especies químicas altamente reactivas. Los electrodos centrales gracias a la alimentación de radio frecuencia aceleran los electrones libres. Esos electrones energéticos producen colisiones inelásticas con el gas de alimentación; produciendo así moléculas en estado excitado; átomos; radicales libres y pares adicionales de ion/electrón (Nehra et al., 2008), (Bayliss et al., 2009), (Gweon et al., 2009).

En la actualidad, los APPJ han evolucionado en diversas configuraciones como por ejemplo la realizada por Cheng y su equipo para aplicaciones de esterilización (Cheng C, et al., 2006). Como uno de los equipos analizados en la presente tesis es un de tipo APPJ vamos a profundizar un poco en este tipo de equipos.

Los autores Lu, Laurossi y Puech (Lu et al., 2012), hicieron la siguiente clasificación de dispositivos APPJ.

- Jets de electrodos libres de barreras dieléctricas (DFE: Dielectric Free Electrode).
- Jets de descarga de barrera dieléctrica.
- DBD-como jets (La mayor parte del tubo del jet esta realizado en material dieléctrico).
- Jets de electrodo simple.

En 2015 los autores Winter, Brandenburg y Weltmann (Winter et al., 2015) deducen 7 diseños geométricos distintos de los Jets a partir de la clasificación citada anteriormente. En la figura 2.7 (Winter et al., 2015) se pueden ver esos diseños.



**Figura 2.7 Geometrías APPJ.**

Las geometrías 1 a 6 muestran un corte transversal de una disposición coaxial, aunque la mayoría de ellos puede realizarse también en disposición rectangular, exceptuando la geometría 5. La geometría 7 es de disposición rectangular.

Como podemos comprobar, los APPJ pueden usar distintos tipos de descarga como la DBD, la MHCD, la conducida por RF de Jets de electrodos libres de dieléctrico o la conducida por microondas. Veamos brevemente cada una de las geometrías.

- La geometría 1 se utiliza como Jets de arco transferido (el arco salta del electrodo del interior del tubo al electrodo ubicado en el exterior). Los dispositivos de este tipo

alimentados con fuentes de tensión apropiada (DC, AC o RF) son capaces de generar jets de plasma no térmicos.

- La geometría 2 representa un arco no transferido (el arco se produce en el interior del tubo). Este tipo de disposición admite varias configuraciones. En una primera configuración, el tubo es conductor y actúa como segundo electrodo (tal disposición es un jet de electrodos sin dieléctrico). En una segunda disposición el tubo es de material dieléctrico (este sería un ejemplo de DBD como jet). En una tercera disposición el primer electrodo  $E_01$  puede tener una capa dieléctrica (este sería un ejemplo de jet de plasma tipo DBD), o puede ser hueco con el fin de inyectar el gas a través de él. En muchos de los casos el electrodo tiene bordes afilados con el fin de mejorar el campo eléctrico local.
- La geometría 3 utiliza dos electrodos de anillo colocados en los extremos del tubo dieléctrico (jet tipo DBD).
- La geometría 4 se basa en el concepto de descarga de cátodo de micro agujero (MHCD).
- La geometría 5 muestra un jet de plasma acoplado inductivamente.
- La geometría 6 representa un jet de plasma generado por microondas utilizando un resonador de cavidad, donde la intensidad del campo tiene su máximo en el centro del resonador.
- La geometría 7 muestra el diseño de un APPJ. La descarga es inducida por RF (normalmente funciona a 13,56 MHz) que utiliza como electrodos dos barras metálicas desnudas cubiertas por ventana de cristal de cuarzo para evitar la intrusión del aire que los rodea.

Los dispositivos estudiados en esta tesis son uno de configuración coaxial que es DBD tipo jet es decir un DBD tipo APPJ, DBD debido al tipo de descarga que se produce y APPJ, tipo jet o chorro debido a como impulsa el plasma al exterior. El otro es un caso particular de un DBD de descarga de superficie denominado SMD (superficie de micro descarga), ambos diseños serán tratados con detalle en el capítulo 3.

Una vez visto los diferentes tipos de descarga y las diferentes configuraciones de dispositivos para generarlo pasaremos a detallar los dispositivos utilizados en esta tesis.

# Capítulo 3:

## Equipamiento para la generación de plasma

Para la generación del plasma frío a presión atmosférica únicamente hacen falta unos electrodos adecuados y una corriente eléctrica adecuada en cuanto a su voltaje, frecuencia, forma de onda e intensidad.

En este punto vamos a describir el equipamiento utilizado en esta tesis con el fin de producir plasma frío a presión atmosférica.

### **3.1. Electrodo para la generación de plasma utilizados en la tesis**

En esta tesis se han diseñado, fabricado y utilizado dos dispositivos diferentes para generar plasma. Para el diseño de dichos dispositivos se ha tenido en cuenta el fin último de su posible aplicación, que es la descontaminación biológica de tejido vivo y la descontaminación biológica de material especialmente sensible (Yu et al., 2007), (Kolb et al., 2008), (Guimin et al. 2009), (Dobrynin et al., 2010), (Li et al., 2012), (Park et al., 2012), (Daeschlein et al., 2012), (Alshraideh et al., 2013), (Cahill et al., 2014) (O'Connor et al., 2014), (Lackmann et al., 2014), (Mai-Prochnow et al., 2014), (Kovalová et al., 2014). Por ello se ha optado por diseñar dos equipos en función de la forma, de interacción del plasma sobre la superficie a tratar, existiendo dos posibilidades, un primer equipo (cámara de electrodos SMD) en el que el plasma interacciona de forma indirecta con la superficie a descontaminar, son la especies reactivas de larga vida producidas por el plasma las que interaccionan con la superficie a tratar o lo que es lo mismo con el material biológico, y un segundo equipo (jet de

plasma) en la que el plasma interacciona directamente con la superficie a descontaminar, es decir los iones, electrones y especies reactivas del plasma interaccionan directamente con el material biológico.

### **3.1.1. Cámara con electrodos planos tipo SMD**

Este dispositivo está pensado especialmente para la descontaminación biológica de superficies especialmente sensibles. También podría ser utilizado para la descontaminación de extremidades como pies y manos.

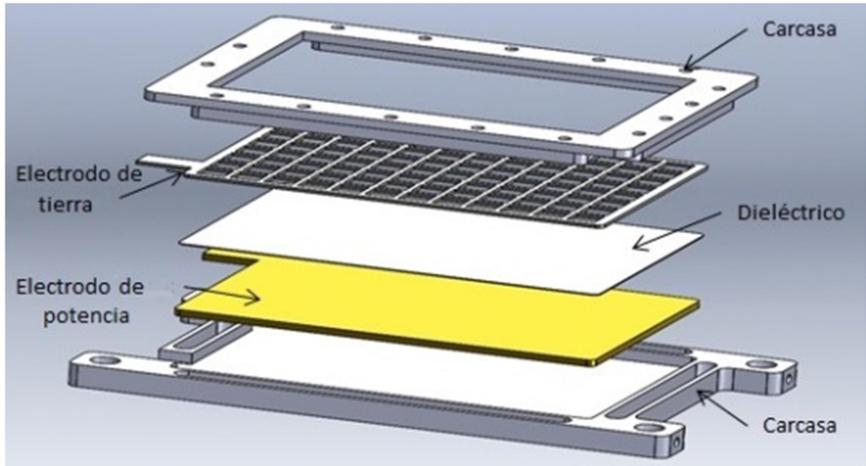
El diseño de este dispositivo ha partido del diseño realizado por Morfill, Shimizu, Steffes y Schmidt (Morfill et al., 2009), usado posteriormente por otros autores (Klämpfl et al, 2012) y utilizado en la tesis doctoral de Tobias G. Klämpfl (Klämpfl, 2014), de hecho en el diseño del prototipo desarrollado en esta tesis se han seguido una serie de mejoras propuestas en dicha tesis. Asimismo también utiliza en su trabajo electrodos SMD Zimmermann JL, Dumler K, Shimizu T, Morfill GE, Wolf A, Boxhammer V, (Zimmermann et al., 2011) y el de Shimizu et al. (Shimizum et al., 2014).

A lo largo de esta tesis a este equipo se le denominará APPC-NTP (Atmospheric Pressure Plasma Chamber – No Thermal Plasma)

#### *a. Los electrodos*

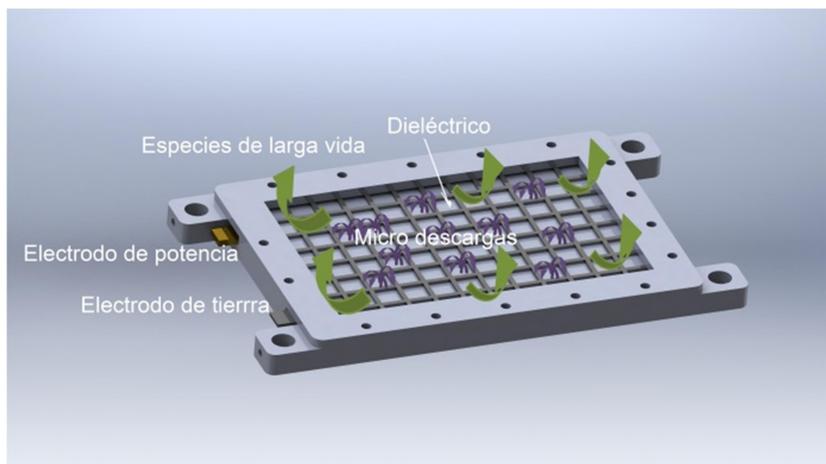
Hemos desarrollado, diseñado y hecho fabricar estos electrodos específicamente para este proyecto. El diseño que aquí se presenta es el diseño final tras numerosas revisiones y modificaciones que se han tenido que realizar durante el desarrollo del proyecto.

Los electrodos de este equipo son de tipo DBD, concretamente un tipo de particular de DBD basado en la tecnología SMD (Surface micro-discharge). En este tipo de tecnología la configuración de electrodos es de tipo sándwich y sigue la siguiente disposición; electrodo de potencia, dieléctrico y electrodo de tierra tipo malla. En la figura 3.1 se puede ver esquemáticamente dicha configuración:



**Figura 3.1 Configuración electrodos SMD**

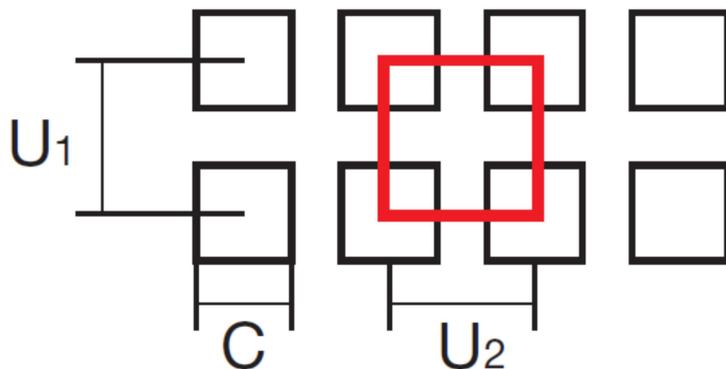
La estructura tipo malla del electrodo de tierra permite que se produzcan filamentos de plasma entre dicho electrodo y la barrera dieléctrica. Estas micro descargas no superan el grosor de la malla por lo que el plasma no actúa directamente sobre la superficie sometida a tratamiento evitando de este modo el daño por calor o por iones locales producidos en el plasma, lo que permite el tratamiento de superficies sensibles y tejidos vivos.



**Figura 3.2 Dinámica del plasma en los electrodos SMD**

En esta tesis el diseño de los electrodos y el dieléctrico están formados por los siguientes materiales con las siguientes dimensiones:

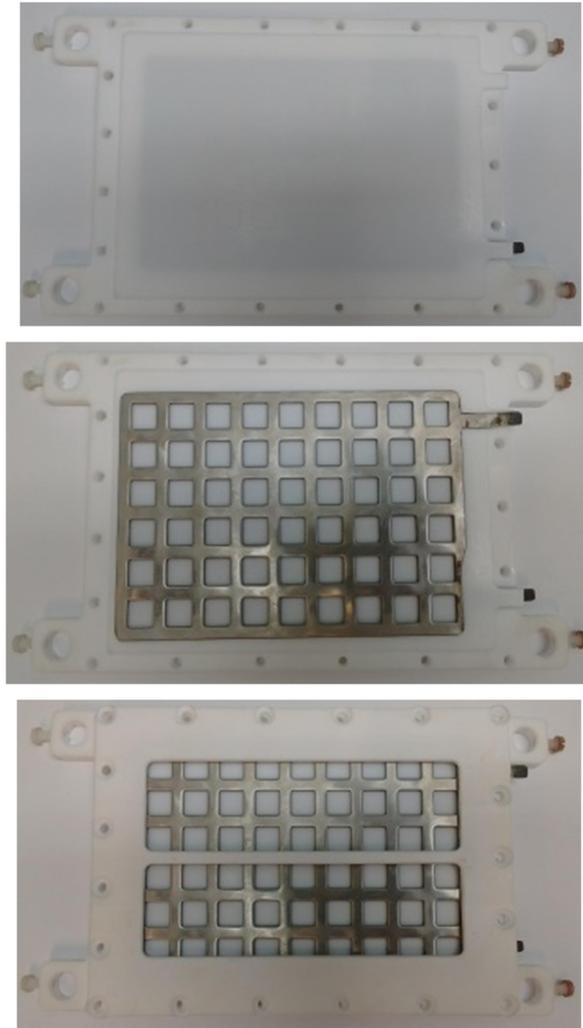
- El electrodo de potencia es de latón con una dimensión de 132 x 86 x 3 mm.
- Como dieléctrico en función del voltaje aplicado se utilizan las siguientes láminas de teflón: 154x109x0.5 mm, 154x109x1 mm, 140x109x1.5 mm y 154x109x2 mm.
- El electrodo de tierra es una malla de acero inoxidable con las siguientes dimensiones. 140x95x1.5 mm. Teniendo la malla las siguientes dimensiones C: 10 mm y U: 13 mm. Con C agujero cuadrado. U: distancia entre centros de agujeros.



**Figura 3.3 Esquema de malla del electrodo de tierra**

Los electrodos están sujetos por una carcasa realizada en teflón en la cual se embuten tanto los electrodos como el dieléctrico.





**Figura 3.4 Electrodos y dieléctrico desarrollados en la tesis.**

La cámara dispone de un par de juegos de estos, uno situado en la parte inferior con electrodo de tierra encarado hacia arriba y otro en la parte superior con el electrodo de tierra encarado hacia abajo. Dichos elementos se pueden desplazar en sentido vertical a través de unas columnas con el fin de variar la distancia a la superficie de tratamiento.



**Figura 3.5 Elementos con los electrodos ubicados en sus columnas.**

*b. La cámara.*

La cámara es otro de los elementos que se ha desarrollado, diseñado y hecho fabricar específicamente para este proyecto. El diseño que aquí se presenta es el diseño final tras numerosas revisiones y modificaciones que se han tenido que realizar.

La cámara está completamente realizada en teflón ya que es un material químicamente muy inerte y de hecho es el material recomendado por Tobias G. Klämpfl (Klämpfl, 2014).

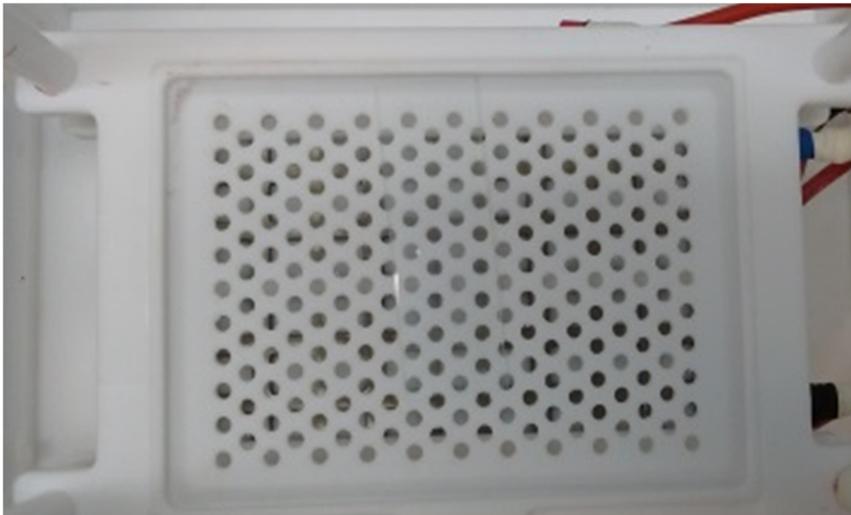
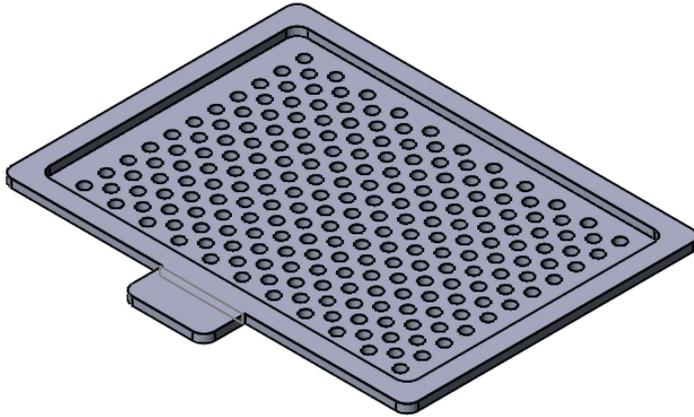
La cámara está diseñada para cumplir diversas funciones a saber:

- Evitar la dispersión de las especies de vida media larga producidas en el plasma.
- Permitir una fácil monitorización del plasma al poder dotarse de sensores.
- Contener las superficies a tratar en su interior.
- Permitir la introducción de gases con el fin de obtener una atmósfera perfectamente conocida con anterioridad a la generación de plasma.
- Permitir mantener unas condiciones atmosféricas estables durante todo el proceso de irradiación.

- Permitir la extracción del aire existente en su interior de forma controlada.

Veamos los detalles constructivos de la cámara: Está formada por 6 paredes que vamos a nombrar como Pn, con n del 1 al 6. En la figura 3.5 se muestra la ubicación de las paredes:

- P1: Techo formado por una plancha de teflón de dimensiones 320x230x15 mm.
- P2: Suelo formado por una placa de teflón de dimensiones 32x230x15 mm.
- P3: Pared trasera: Formada por teflón de dimensiones: 320x240x15 mm. Dispone de una llave para permitir la salida de aire de forma controlada
- P4: Pared frontal: Las dimensiones de esta pared son: 320x240x15 mm. Dispone de una puerta acristalada de dimensiones: 249.5x189.5x0.5 mm. La función de esta puerta es permitir observar el interior de la cámara.
- P5: Pared derecha, las dimensiones de esta pared son las siguientes: 209.5x240x15 mm. En esta pared existe una llave de paso de aire para permitir la entrada de aire u otro gas en el interior de la cámara, además dispone de varias aberturas cuya función es permitir la introducción de diversos sensores dentro de la cámara. En esta pared también se ubican los conectores eléctricos de los electrodos.
- P6. Pared izquierda de dimensiones: 209.5x240x15 mm. Esta pared se encuentra dotada de cristal de cuarzo de dimensiones: 100x150x3 mm y unas guías por donde corre el espectrómetro en dirección vertical.
- Soporte de muestras: Se encuentra centrado sobre el volumen interno de la caja y está fabricado en teflón con las siguientes dimensiones: 148x108x6 mm. Sobre él se ubica la superficie a tratar.



**Figura 3.6** Rejilla portamuestras

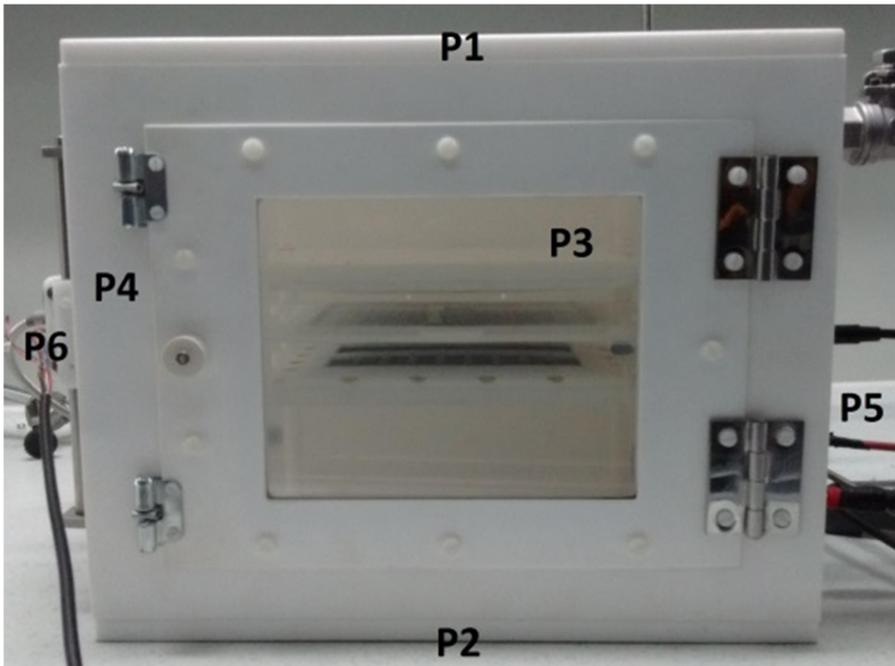


Figura 3.7 Cámara.

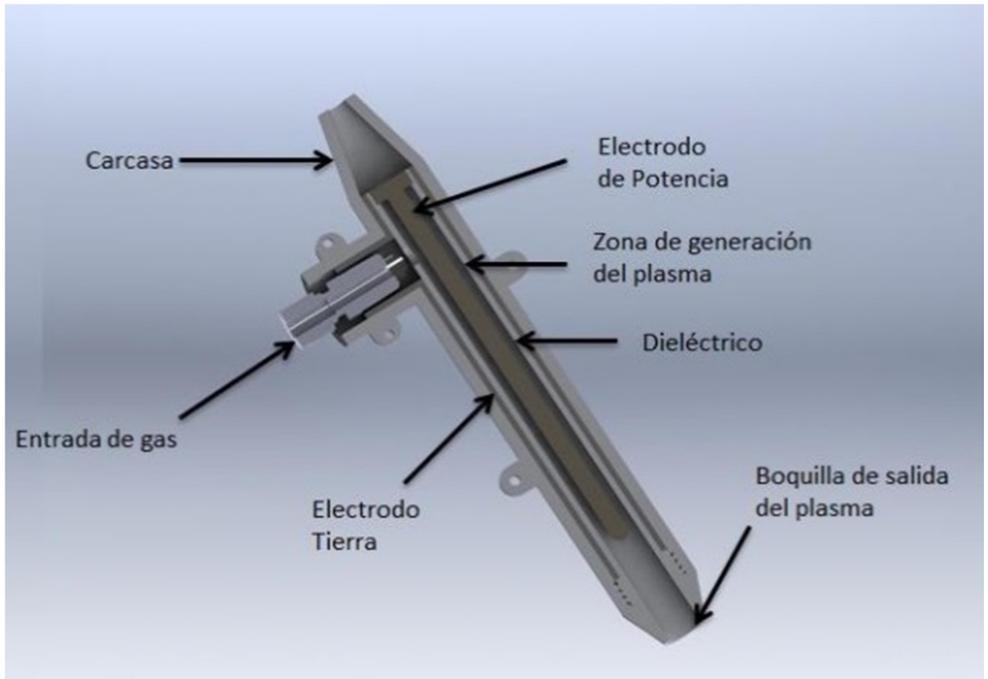
### 3.1.2. Jet de electrodos cilíndricos tipo DBD

La jet es otro de los elementos que se ha desarrollado, diseñado y hecho fabricar específicamente para este proyecto. El diseño que aquí se presenta es el diseño final tras numerosas revisiones y modificaciones que se han tenido que realizar con el fin de mejorar su funcionamiento. En este caso el desarrollo, diseño y la fabricación ha alcanzado tanto a los electrodos como a la carcasa protectora.

El jet diseñado en esta tesis es de tipo DBD, la descarga se produce entre el electrodo de potencia y el dieléctrico, y el plasma es impulsado por el gas introducido al exterior del jet, con lo que existe una interacción directa entre la superficie a tratar y el plasma. A lo largo de la tesis este equipo se le denominará APPJ-NTP. (Atmospheric Pressure Plasma Jet – No Thermal Plasma).

Para diseñar este dispositivo se ha partido del diseñado por Li Z, Li Y, Cao P, Zhao H (Li et al., 2013).

Se puede ver un esquema del este equipo en la siguiente figura.



**Figura 3.8 Esquema APPJ-NTP.**

*a. Los electrodos*

Los electrodos son de tipo DBD de forma cilíndrica y como se puede ver en el esquema anterior está formado por:

- Barra de acero inoxidable que forma el electrodo de potencia, disponible en varios diámetros: 9, 9.5, 10 y 10.5 mm.



**Figura 3.9 Electrodo de potencia del APPJ-NTP.**

- Concéntrica a ésta se sitúa el dieléctrico que es un tubo de cuarzo recubierto de grafito, que además de dieléctrico tiene como misión conducir el caudal de gas y el plasma al exterior del jet. Con las siguientes dimensiones: 14 mm diámetro interior, 2 mm de grosor y 100 mm de longitud.



**Figura 3.10** Tubo de cuarzo recubierto de grafito APPJ-NTP.

- Concéntrico y totalmente pegado a este se encuentra un tubo de acero inoxidable que ejerce la función de electrodo de tierra además de servir como embocadura de la toma de gas. Con las siguientes dimensiones: 15 mm de diámetro interno, 3 mm de espesor y 89 mm de longitud.



**Figura 3.11** Electrodo de tierra. APPJ-NTP.

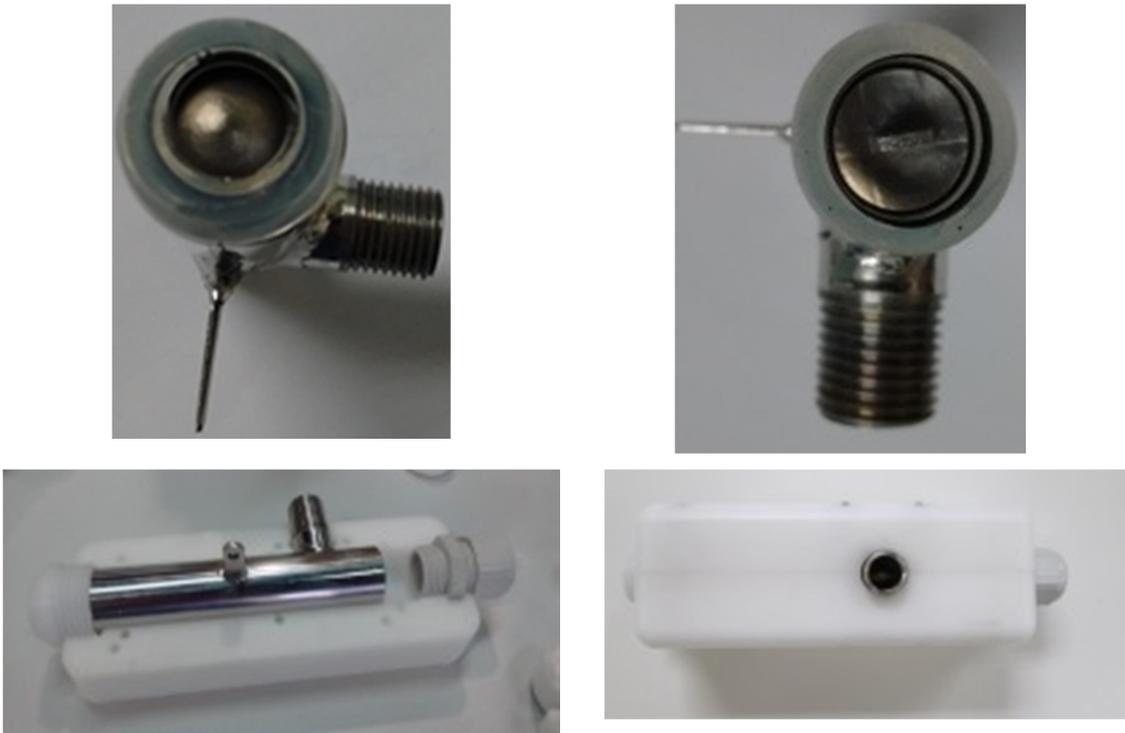


Figura 3.12 APPJ-NTP.

### 3.2. Generador de funciones

El generador de funciones es otro de los equipos necesarios para generar plasma, su misión es generar la señal eléctrica que luego será guiada hasta el amplificador de alta tensión.

Las características principales de esta señal eléctrica son su forma de onda, voltaje y frecuencia.

El generador de funciones utilizado en esta tesis es un Rigol modelo DG5072



Figura 3.13 Generador de funciones.

Las principales características de este modelo se pueden ver en la tabla 3.1.

<b>Marca</b>	<b>RIGOL</b>
<b>Modelo</b>	<b>DG5072</b>
<b>Canales</b>	2
<b>Máxima frecuencia</b>	70 MHz
<b>Tasa muestreo</b>	1 GSa/s
<b>Formas de onda</b>	
<b>Formas de onda estándar</b>	Sinusoidal, cuadrada, rampa, pulso, ruido
<b>Forma de onda arbitrarias</b>	Sinc, aumento exponencial, disminución exponencial, ECG, Gauss, Lorentz, HARverSine, Dual-Tone, Dc
<b>Características de la frecuencia</b>	
<b>Sinusoidal</b>	1 $\mu$ Hz to 70 MHz
<b>Cuadrada</b>	1 $\mu$ Hz to 70 MHz
<b>Rampa</b>	1 $\mu$ Hz to 3 MHz
<b>Pulso</b>	1 $\mu$ Hz to 50 MHz
<b>Ruido</b>	250 MHz Ancho de banda
<b>Arbitraria</b>	1 $\mu$ Hz to 50 MHz
<b>Resolución</b>	1 $\mu$ Hz
<b>Precisión</b>	$\pm 1$ ppm, 18 °C to 28 °C
<b>Pureza del espectro de la onda Sinusoidal</b>	
<b>Distorsión armónica</b>	Típica(0 dBm) $\leq 70$ MHz: <-45dBc
<b>Distorsión total armónica</b>	<0.5% (10 Hz to 20 kHz, 0 dBm)

<b>Espurios (no armónica)</b>	Typical (0 dBm) $\leq 70$ MHz: $< -50$ dBc
<b>Ruido de fase</b>	Typical (0 dBm, 10 kHz deviation) 10 MHz: $< -110$ dBc
<b>Características de la señal</b>	
<b>Cuadrada</b>	
<b>Tiempo subida/bajada</b>	Valor típico (1Vpp) $< 4$ ns
<b>Overshoot</b>	Valor típico (1Vpp) $< 5\%$
<b>Ciclo de trabajo</b>	$\leq 10$ MHz: 20.0% to 80.0% 10 MHz to 40 MHz: 40.0% to 60.0% $> 40$ MHz: 50.0% (fixed)
<b>Asimetría</b>	1% para periodo +5 ns
<b>Inestabilidad (rms)</b>	Valor típico (1Vpp) $\leq 30$ MHz: 10 ppm+500 ps $> 30$ MHz: 500 ps
<b>Rampa</b>	
<b>Linealidad</b>	$\leq 0.5\%$ de pico de salida
<b>Simetría</b>	0% to 100%
<b>Pulso</b>	
<b>Periodo</b>	20 ns to 1000000 s
<b>Anchura de pulso</b>	4 ns to 1000000 s
<b>Tiempo de Subida/ Bajada</b>	4 ns to 1 ms
<b>Overshoot</b>	Valor típico (1Vpp) $< 5\%$
<b>Inestabilidad (rms)</b>	Valor típico (1Vpp) 10 ppm+500 ps
<b>Arbitraria</b>	
<b>Longitud de onda</b>	Modo normal: 2 a 16M puntos Modo jugar: 2 a 128M puntos
<b>Resolución vertical</b>	14 bits
<b>Modos</b>	Modo Normal y modo jugar
<b>Tasa de muestra</b>	Modo normal (longitud de onda de 2 a 16M puntos): 1G Sa/s (fijo); Modo jugar (Longitud de onda de 2 a 128M puntos): $\leq 1$ G Sa/s (variable)
<b>Tiempo mínimo subida/bajada</b>	Valor típico (1Vpp) $\leq 3$ ns
<b>Inestabilidad (rms)</b>	3 ns
<b>Método de interpolación</b>	Cerrado, lineal, Sinc
<b>Método edición</b>	Edición punto, edición bloque
<b>Memoria no volátil</b>	1G Bytes
<b>Características de salida</b>	
<b>Amplitud (con 50 <math>\Omega</math>)</b>	
<b>Rango</b>	5mVpp to 10Vpp
<b>Precisión</b>	Típica (1 kHz Sinusoidal, 0 V

	Desviación, >10 mVpp, Auto) $\pm 1\%$ del ajuste $\pm 1$ mVpp
<b>Llanura Amplitud (relativa a 100 kHz, 1.25Vpp onda sinusoidal, 50<math>\Omega</math>)</b>	10MHz: $\pm 0.1$ dB 10MHz a 60MHz: $\pm 0.2$ dB 60MHz a 70MHz: $\pm 0.4$ dB
<b>Unidades</b>	Vpp, Vrms, dBm, Hig, Nivel alto, Nivel bajo
<b>Resolución</b>	0.1 mV o 4 dígitos
<b>Arb tiempos de descarga (Transferencia binaria)</b>	1 Mpts/s Nota: El tiempo de descarga no incluyen la instalación o el tiempo de salida.
<b>Cero (a 50 <math>\Omega</math>)</b>	
<b>Rango</b>	$\pm 5$ Vpk ac + dc
<b>Precisión</b>	1% de la establecida + 5mV + 0.5% de amplitud
<b>Salida de la forma de onda</b>	
<b>Impedancia</b>	50 $\Omega$ (typical)
<b>Aislamiento</b>	42 Vpk max. a Earth
<b>Protección</b>	Protección temperatura alta, protección corto circuito, relé de sobrecarga desactiva automáticamente la salida principal
<b>Características FM</b>	
<b>Ancho de banda FM</b>	1.5 MHz to 70 MHz
<b>Tasa FM</b>	1 Hop/s to 12.5M Hop/s
Números de puntos de frecuencia	4096
Longitud de secuencia	4096
<b>Características de modulación</b>	
<b>Tipos de modulación</b>	AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK, PWM, IQ
<b>AM</b>	
<b>Formas de onda portadoras</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (excepto DC)
<b>Fuente</b>	Interna/Externa
<b>Formas de onda de modulación</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (2 mHz to 50 kHz)
<b>Ancho</b>	0% to 120%
<b>FM</b>	
<b>Formas de onda portadoras</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (excepto DC)
<b>Fuente</b>	Interna/Externa
<b>Formas de onda de modulación</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (2

	mHz to 50 kHz)
<b>PM</b>	
<b>Formas de onda portadoras</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (excepto DC)
<b>Fuente</b>	Interna/Externa
<b>Formas de onda de modulación</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (2 mHz to 50 kHz)
<b>Desfase</b>	0° to 360
<b>ASK</b>	
<b>Formas de onda portadoras</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (excepto DC)
<b>Fuente</b>	Interna/Externa
<b>Formas de onda de modulación</b>	Cuadrada con ciclo de trabajo de 50% (2 mHz a 1 MHz)
<b>FSK</b>	
<b>Formas de onda portadoras</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (excepto DC)
<b>Fuente</b>	Interna/Externa
<b>Formas de onda de modulación</b>	Cuadrada con ciclo de trabajo de 50% (2 mHz a 1 MHz)
<b>PSK</b>	
<b>Formas de onda portadoras</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (excepto DC)
<b>Fuente</b>	Interna/Externa
<b>Formas de onda de modulación</b>	Cuadrada con ciclo de trabajo de 50% (2 mHz a 1 MHz)
<b>PWM</b>	
<b>Formas de onda portadoras</b>	Pulso
<b>Fuente</b>	Interna/Externa
<b>Formas de onda de modulación</b>	Sinusoidal, Cuadrada, Rampa, Arb (2 mHz a 50 kHz)
<b>Anchura desviación</b>	0% a 100% de la anchura de pulso
<b>IQ</b>	
<b>Formas de onda portadoras</b>	Sinusoidal (max. 70 MHz).
<b>Fuente</b>	Interna/Externa
<b>Patrón de código</b>	Secuencia PN, Patrón código 4 bits, Usuario.
<b>ARB</b>	
<b>Longitud forma onda</b>	Modo normal: 2 a 16M puntos Modo jugar: 2 a 128M puntos
<b>Resolución vertical</b>	14 bits
<b>Modo</b>	Modo norma, Modo jugar

<b>Tasa de muestrea</b>	Modo normal (longitud de onda es de 2 a 16M puntos): 1 G Sa/s (fijo); Modo jugar (longitud de onda es de 2 a 128M puntos): $\leq 1$ G Sa/s (variable).
<b>Mínimo tiempo de subida/bajada</b>	Valor típico (1Vpp) $\leq 3$ ns
<b>Inestabilidad (rms)</b>	3 ns
<b>Método interpolación</b>	Cerrado, lineal, Sinc
<b>Método edición</b>	Edición punto, edición bloque
<b>Memoria no volátil</b>	1G Bytes
<b>Características del disparador</b>	
<b>Entrada del disparador</b>	
<b>Nivel</b>	Compatible TTL
<b>Pendiente</b>	Subida o bajada (seleccionable)
<b>Anchura de pulso</b>	$> 50$ ns
<b>Latencia</b>	Barrido: $< 100$ ns (típico) Ráfaga $< 300$ ns (típico)
<b>Salida del disparador</b>	
<b>Nivel</b>	Compatible TTL
<b>Anchura de pulso</b>	$> 60$ ns (Típico)
<b>Tasa máxima</b>	1 MHz
<b>Referencia de reloj</b>	
<b>Desplazamiento de fase</b>	
<b>Rango</b>	$0^\circ$ a $360^\circ$
<b>Resolución</b>	$0.001^\circ$ (forma de onda arb), $0.03^\circ$ (otras formas de onda)
<b>Entrada de referencia externa</b>	
<b>Rango de bloqueo</b>	$10$ MHz $\pm 50$ Hz
<b>Nivel</b>	$80$ mVpp a $10$ Vpp
<b>Tiempo de bloqueo</b>	$< 2$ s
<b>Entrada de referencia interna</b>	
<b>Frecuencia</b>	$10$ MHz $\pm 50$ Hz
<b>Nivel</b>	$632$ mVpp (0 dBm), Valor nominal
<b>Salida de sincronización</b>	
<b>Nivel</b>	Compatible TTL
<b>Impedancia</b>	$50 \Omega$ , Valor nominal
<b>Especificaciones generales</b>	
<b>Energía</b>	
<b>Voltaje</b>	$100$ - $127$ V, $45$ - $440$ Hz $100$ - $240$ V, $45$ - $65$ Hz
<b>Consumo</b>	Menos de $125$ W
<b>Fusible</b>	$250$ V, T3A

Pantalla	
Tipo	4.3-inch TFT LCD
Resolución	480 Horizontal × RGB × 272 Vertical
Color	16M
Entorno	
Rango de temperatura	Encendido: 10°C a 40°C Apagado: -20°C a 60°C
Método refrigeración	Refrigeración mediante ventiladores
Rango humedad relativa	a menos de 35°C ≤90% 35°C a 40°C: ≤60 %
Altura	Encendido: Menos de 3000 m Apagado: menos de 15000 m
Mecánicas	
Dimensiones (AxAlxP)	230 mm × 106 mm × 501 mm
Peso	4.3 kg
Conexiones	
USB Host (2), USB Device, GPIB, LAN	
Protección IP	
IP2X	

Tabla 3.1 Características del generador de funciones Rigol modelo DG 5077.

### 3.3. Amplificador de alto Voltaje

En el desarrollo de esta tesis se han utilizado dos amplificadores de alta tensión. Uno capaz de dar libre de carga una tensión máxima pico-pico de 20 kVpp y otro capaz de dar libre de carga una tensión máxima pico-pico de 40 kVpp.

El primer amplificador es de la marca Trek modelo 10/10B-HS, este modelo ya ha sido probado con éxito en otros trabajos de investigación (Klämpfl et al., 2012).



Figura 3.14 Amplificador de alto voltaje.

Las principales características de este modelo se pueden ver en la tabla 3.2.

<b>Marca</b>	<b>TREK</b>
<b>Modelo</b>	<b>10/10B-HS</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Rango Voltaje de salida</b>	0 a $\pm 10$ kV DC o pico AC
<b>Rango de corriente de salida</b>	0 a $\pm 10$ mA DC o $\pm 40$ mA pico para 1 ms C
<b>Rango de voltaje de entrada</b>	0 a $\pm 10$ V DC o pico AC
<b>Impedancia de entrada</b>	20 k $\Omega$ , nominal
<b>Ganancia voltaje DC</b>	1000 V/V
<b>Precisión de la ganancia de voltaje DC</b>	Mejor que 0.1% del total de escala
<b>Voltaje DC de corte</b>	Menor a $\pm 2$ V
<b>Velocidad (10% a 90% típica)</b>	Superior a 700V/ $\mu$ s
<b>Ancho de banda de la señal pequeña (-3bd)</b>	DC a más de 60 kHz
<b>Ancho de banda de la señal grande (-3db)</b>	DC a más de 19.5 kHz
<b>Ancho de banda de la señal grande (Distorsión 1%)</b>	DC a más de 9.5 kHz
<b>Estabilidad</b>	
<b>Deriva con el tiempo</b>	Menos de 100 ppm/h, no acumulativo
<b>Deriva con la temperatura</b>	Menos de 100 ppm/ $^{\circ}$ C
<b>Monitorización del voltaje</b>	
<b>Razón</b>	1 V/1000 V
<b>Precisión DC</b>	Mejor que 0.1% del total de escala
<b>Voltaje de corte</b>	Menor a $\pm 3$ mV
<b>Ruido de salida</b>	Menos que 20 mV rms
<b>Impedancia de salida</b>	47 $\Omega$ ,
<b>Monitorización de la corriente</b>	
<b>Razón</b>	1 V/4 mA
<b>Precisión DC</b>	Mejor que 0.1% del total de escala
<b>Voltaje de corte</b>	Menor que $\pm 10$ mV
<b>Ruido de salida</b>	Menos que 50 mV rms
<b>Ancho de banda (-3dB)</b>	DC a más de 10 kHz
<b>Impedancia de salida</b>	47 $\Omega$
<b>Características mecánicas</b>	
<b>Dimensiones</b>	190 mm Alto x 432 mm Ancho 417 mm Profundo
<b>Peso</b>	14.9 kg
<b>HV Conector</b>	Conector de alto voltaje Alden
<b>Conectores BNC</b>	Entrada amplificador, motorización

	voltaje, monitorización corriente, On/Off remoto, salidas para regular estatus, estatus fallo/viaje.
<b>Condiciones de operación</b>	
<b>Temperatura</b>	0°C a 40°C
<b>Humedad relativa</b>	Hasta 80% sin condensación
<b>Altura</b>	Hasta 2000 m
<b>Características eléctricas</b>	
<b>Alimentación</b>	90 a 127 V AC a 48 Hz 180 a 250 V AC a 63 Hz
<b>Consumo</b>	680 VA máximo

**Tabla 3.2 Características del amplificador de alto voltaje Trek modelo 10/10 B-HS.**

Con el fin de probar otro tipo de amplificador se adquiere un segundo amplificador. Se desea elevar el voltaje a 40 kV y al mismo tiempo aumentar la frecuencia. El amplificador que se adquiere es de la marca GBS elektronik modelo Minipuls 4 y al igual que el otro amplificador ya ha sido probado con éxito en otro trabajo de investigación (Kostov et al., 2014). En este caso el amplificador no viene ensamblado, lo que se adquiere son dos placas una la de etapa puente y otra la de los transformadores en cascada por lo que el montaje de las placas, alimentación, conexiones, interruptores, etc., las realizamos en el laboratorio.

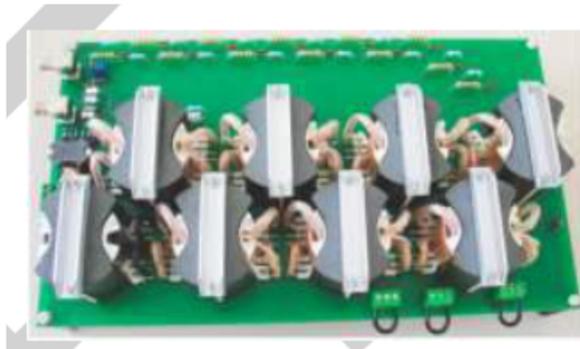




Figura 3.15 Amplificador de alto voltaje A-GBS minipuls 4.

Las características principales se encuentran en la tabla 3.3

Marca	GBS elektronik
Modelo	MINIPULS4
<b>Placa de puente completo</b>	
Tensión de alimentación	15-40 V
Máxima potencia de entrada	<320 W
Máxima potencia media de salida	300 W
Pico límite de corriente	40 A
Sobre temperatura	Cierre
Fusible fuente de alimentación	10 A
Frecuencia de pulso nominal	10 kHz
Rango de frecuencia recomendado	5 -20 kHz
Rango de frecuencia posible	0 50 kHz
Forma de onda	El puente completo proporciona la señal de onda cuadrada, ya sea con un voltaje positivo, voltaje negativo, o una pausa de 0 V, dependiendo de la señal de control de entrada
Tamaño	127*178 mm
Peso	0.37 kg
<b>Transformadores en cascada PM62</b>	
Número de transformadores de cascada	7 (PM 62)
Máximo voltaje de salida	20 kV pico a 10 kHz, dependiendo de la carga y la frecuencia
Máximo pico de corriente de salida	220 mA
Monitorización de voltaje de salida	1:2000

<b>(BNC)</b>	
<b>Monitorización de corriente de salida</b>	10 V/A
<b>Voltajes máximos de salida alimentado el circuito a 30V</b>	<b>11, 22,</b>
<b>Tamaño</b>	199 x 345 mm
<b>Peso</b>	4.1 kg
<b>Condiciones ambientales</b>	
<b>Rango de temperatura operacional</b>	0-35 °C
<b>Humedad</b>	0-80%
<b>Protección</b>	clase III, IP 00, excepto salida HV

**Tabla 3.3 Características de las placas amplificadoras de alto voltaje A-GBS minipuls 4**

### 3.4. Sistema de gases

El gas en la generación de plasma tiene una gran importancia ya que dependiendo del tipo de gas utilizado, entre otras cosas, se generarán diferentes especies reactivas en el plasma. Luego el control de su pureza es de importancia capital.

De esta forma en el equipo APPC-NTP el gas tiene como función la de disponer una atmósfera interior perfectamente controlada en cuanto a su composición y humedad antes de iniciar la generación de plasma, por lo que se inyectará un gas perfectamente conocido (en nuestro caso aire cero a diferentes humedades) antes de iniciar la conexión de los electrodos.

En el equipo APPJ-NTP el gas (aire cero a diferentes humedades) se inyecta con un determinado caudal entre el electrodo de potencia y el dieléctrico y tiene las siguientes funciones:

- Ser el soporte donde se genera el plasma. (ionización del gas)
- Impulsar el plasma al exterior del jet.
- Refrigerar los electrodos y la superficie a tratar.

Con el fin de controlar los gases donde se va a producir la ionización y por lo tanto el plasma se dispone de un sistema de tratamiento de gases compuesto por dos elementos principales:

- Generador de Aire Cero.
- Mezclador y humidificador de gases.

El sistema está diseñado para poder cambiar la proporción de  $O_2$  del aire cero conectando al sistema una botella de oxígeno y controlando el caudal de entrada mediante un caudalímetro de gases.

*a. El Generador de Aire Cero.*

Definición de Aire Cero: Aire atmosférico purificado con un contenido total de hidrocarburos por debajo de 0.1 ppm (United States Environmental Protection Agency, 2017). En general se entiende como un aire ambiental tratado libre de contaminantes.



**Figura 3.16 Sistema de gases.**

Las características generales del generador de aire cero son las siguientes:

<b>Marca</b>	
<b>Modelo</b>	<b>ZAG-50</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Caudal de salida</b>	0 a 50 l/min
<b>Presión de salida máxima</b>	5.5 bar
<b>CH<sub>4</sub>, CO, NO<sub>x</sub> salida</b>	< 0.05 ppm
<b>CO<sub>2</sub> nivel salida</b>	< 5 ppm
<b>Punto de rocío</b>	- 50°C
<b>Nivel de filtración de partículas</b>	0.1 micrón
<b>Dimensiones (Al x An x L)</b>	725 x 450 x 665 mm
<b>Peso</b>	80 kg
<b>Temperatura trabajo</b>	5-35°C
<b>Alimentación</b>	220 V

Tabla 3.4 Características del generador de aire Cero

*b. El sistema mezclador de gases*

Está formado por:

- Dos electroválvulas.
- Dos filtros de partículas.
- Un caudalímetro másico para el aire cero.
- Un caudalímetro másico para O<sub>2</sub>.
- Un burbujeador que puede ser puentado mediante dos válvulas manuales, una de entrada y una de salida que permiten controlar el caudal que de gas que pasa por el con el fin de controlar la humedad del gas.
- Una unidad electrónica que controla los caudalímetros másicos tanto de aire cero como de O<sub>2</sub>.

Las características principales de estos elementos son:

<b>ELECTROVÁLVULAS</b>	
<b>Características técnicas</b>	
<b>Material</b>	Acero inoxidable
<b>Conexiones</b>	1/4"
<b>alimentación</b>	24V

Tabla 3.5 Características de las electroválvulas del mezclador de gases.

<b>FILTROS DE PARTÍCULAS</b>	
<b>Marca</b>	<b>HOKE</b>
<b>Modelo</b>	<b>6323G4Y</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Material</b>	AISI 316/ juntas teflón
<b>Filtración</b>	10/15 micras

Tabla 3.6 Características de los filtros de partículas.

<b>VÁLVULAS MANUALES</b>	
<b>Marca</b>	<b>HOKE</b>
<b>Modelo</b>	<b>6133G4Y</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Material</b>	AISI 316/ juntas teflón

Tabla 3.7 Características de las válvulas manuales.

<b>CAUDALÍMETRO MÁSSICO DE AIRE CERO</b>	
<b>Marca</b>	<b>BRONKHORST</b>
<b>Modelo</b>	<b>HI-TEC F-201AV-RAD-22-V</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Material</b>	
<b>Cuerpo</b>	Acero AISI 316
<b>Juntas</b>	Vitón
<b>Precisión</b>	
	+/- 0.8% de lectura +/- 0.2% f.e.
<b>Rango de medida</b>	1-50 ln / min aire
<b>Presión máxima de trabajo</b>	64 bar
<b>Presión de entrada</b>	3-4 bar
<b>Presión salida:</b>	EMC input
<b>Rango Temperatura</b>	0 – 70 °C
<b>Temperatura de trabajo</b>	20 °C
<b>Conexiones</b>	1/4 "
<b>Control válvula normalmente cerrada</b>	
<b>Señal entrada/salida</b>	0-5 Vdc / RS232 / FLOWBUS
<b>Voltaje de entrada</b>	+15 ... 24 Vdc
<b>Protección</b>	IP40

Tabla 3.8 Características del control de caudal BRONKHORST hi-tec F-201AV-RAD-22-V.

<b>CAUDALÍMETRO MÁSIICO DE O<sub>2</sub></b>	
<b>Marca</b>	<b>BRONKHORST</b>
<b>Modelo</b>	<b>F-201CV-RAD-22-V</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Material</b>	
<b>Cuerpo</b>	Acero AISI 316
<b>Juntas</b>	Vitón
<b>Precisión</b>	+/- 0.8% de lectura +/- 0.2% f.e.
<b>Rango de medida</b>	0.2-10 ln / min O <sub>2</sub>
<b>Presión máxima de trabajo</b>	64 bar
<b>Presión de entrada</b>	3-4 bar
<b>Presión salida:</b>	EMC input
<b>Rango Temperatura</b>	0 – 70 °C
<b>Temperatura de trabajo</b>	20 °C
<b>Conexiones</b>	1/4 "
<b>Control válvula normalmente cerrada</b>	
<b>Señal entrada/salida</b>	0-5 Vdc / RS232 / FLOWBUS
<b>Voltaje de entrada</b>	+15 ... 24 Vdc
<b>Protección</b>	IP40

Tabla 3.9 Características del control de caudal BRONKHORST hi-tec F-201CV-RAD-22-V.



Figura 3.17 Caudalímetro másico BRONKHORST HI-TEC F-201AV.

<b>CONTROLADOR ELECTRÓNICO</b>	
<b>Marca</b>	<b>BRONKHORST</b>
<b>Modelo</b>	<b>HI-TEC E-8103-2A-1A-00</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Pantalla</b>	
<b>Tipo de Pantalla</b>	1.8" color TFT
<b>Resolución pantalla</b>	128x160 pixeles
<b>Procesador</b>	100 MHz
<b>Alimentación</b>	15..24Vdc
<b>Consumo</b>	0.6W
<b>Comunicación</b>	RS232 38k4n
<b>Temperatura de operación</b>	0..40°C
<b>Tamaño (mm)</b>	76 ancho x 138.4 alto x 260 largo

Tabla 3.10 Características del controlador electrónico BRONKHORST HI-TEC E-8103-2A-1A-00.



Figura 3.18 Controlador del mezclador de gases. BRONKHORST HI-TEC E-8103-2A-1A-0.

# Capítulo 4:

## Parámetros a medir

Las variables a medir las podemos dividir en dos grupos diferenciados:

1. El primer grupo permiten conocer en todo momento los parámetros que tienen que ver con la entrada del sistema generador del plasma:
  - Parámetros característicos de la señal eléctrica de entrada es decir, la diferencia de potencial o voltaje, la intensidad de corriente o amperaje y la frecuencia.
  - Parámetros característicos del ambiente, tipo de gas y humedad en el caso del sistema APPC-NTP y tipo de gas, humedad y caudal en el caso APPJ-NTP.
2. El segundo grupo tiene que ver con parámetros de salida del plasma y sus condiciones de entorno como son el espectro de emisión del plasma, la temperatura a la que se irradia la muestra, la temperatura interior de la cámara y la humedad del gas que se encuentra en la cámara en cada momento de la irradiación.

Esta tesis trata de establecer correlaciones entre las diferentes variables de entrada y de salida.

### 4.1. Parámetros de entrada

Las variables o parámetros de entrada a tener en cuenta, y que tengan que ver con la producción de plasma difieren para el prototipo APPC-NTP y para el APPJ-NTP, aunque tienen en común algunas de ellas. Por lo que este punto lo desarrollaremos indicando qué variables hemos tenido en cuenta en cada prototipo al poder ser medidas al mismo tiempo y los equipos de medida utilizados.

#### 4.1.1. Parámetros de entrada del sistema APPC-NTP

Los parámetros de entrada para el sistema APPC-NTP son: voltaje, frecuencia, amperaje, grosor del dieléctrico y humedad al inicio de la irradiación. Veamos ahora cada uno de estos parámetros.

##### *a. Voltaje*

El voltaje o tensión aplicada al sistema es uno de los parámetros más importantes tanto en la producción de plasma como en las características de éste.

Para un sistema de electrodos dado no son posibles todas las tensiones, ni todas las tensiones producen plasma.

El rango de voltaje de entrada para el sistema desarrollado en la tesis varía entre 8 y 28 kV. Dicho rango se obtiene por observación visual de la producción de plasma, por debajo del voltaje mínimo no se observa producción de plasma ni para el dieléctrico de menor grosor (0,5 mm). Se debe tener en cuenta además que se han usado dos amplificadores de tensión diferentes para abarcar todo el rango de tensión:

- Trek modelo 10/10B-HS que abarca el rango de 8 a 20 kV.
- GBS elektronik modelo Minipuls 4 con un voltaje de alimentación de 30 V. Debido al sistema de variación de la tensión que es mediante puente de etapas de potencia en total 4 solo se pueden conseguir como máximo las siguientes tensiones pico de trabajo: 11, 14, 17 y 20 kV que equivalen a 22, 28, 34 y 40 kV<sub>pp</sub>, utilizando en esta tesis las tensiones de 22 y 20 kV<sub>pp</sub>.

##### Medida del voltaje

Nuestro sistema de generación del voltaje parte de un generador de funciones capaz de generar tensión pico-pico entre 5 mV<sub>pp</sub> a 10 V<sub>pp</sub> con diferentes frecuencias, el amplificador amplifica esta señal modificando la amplitud pero sin modificar la frecuencia, por lo que trataremos de medir el voltaje una vez amplificado. Esto se consigue a través de dos sistemas diferenciados:

- Un primer sistema que viene dado directamente por el amplificador que permite conectar una salida BNC (Bayonet Neill-Concelman) a un osciloscopio y obtener de esta forma la tensión de salida.
- Un segundo sistema es a través de una sonda de alto voltaje externa conectada en la salida de la alta tensión y al osciloscopio.

El osciloscopio es de la marca Tektronix modelo TDS 2024C y la sonda de alta tensión es de la marca Tektronix modelo P6015A ambos utilizados con éxito en otros trabajos de investigación (Lu et al., 2009), (Li et al., 2013), (Pei et al, 2014), (Kostov et al, 2014).

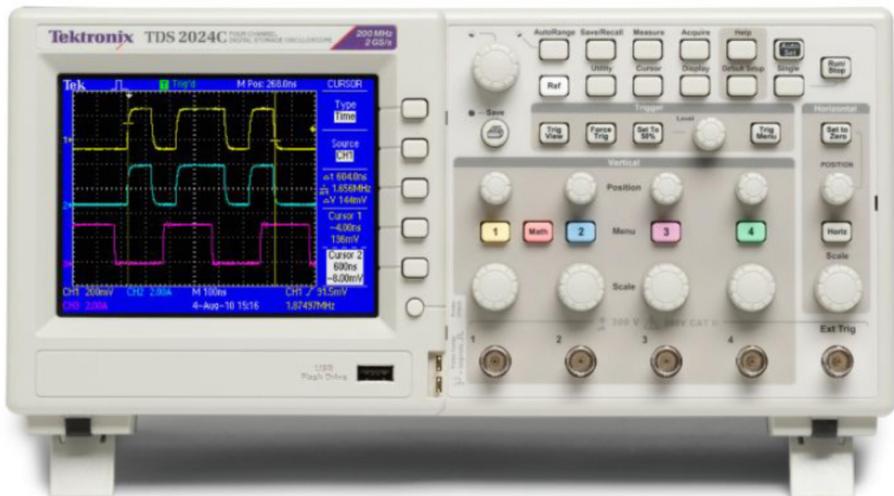


Figura 4.1 Osciloscopio Tektronix TDS 2024C.



Figura 4.2 Sonda de Alta tensión Tektronix modelo P6015A.

Las características generales de estos equipos son:

<b>OSCILOSCOPIO</b>	
<b>Marca</b>	<b>TEKTRONIX</b>
<b>Modelo</b>	<b>TDS 2024C</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Especificaciones de adquisición</b>	
<b>Modos de adquisición</b>	Muestra, Detección de picos y Promedio
<b>Especificaciones de entrada</b>	
<b>Acoplamiento de entrada</b>	CC, CA o tierra
<b>Impedancia de entrada, CC acoplado</b>	1 MΩ ±2% en paralelo con 20 pF ±3 pF
<b>Voltaje máximo de entrada</b>	En el conector del panel frontal, 300 V RMS, Categoría de instalación II, reduce el régimen a 20 dB/década sobre 100 kHz hasta 13 V de CA pico a 3 MHz y más.
<b>Especificaciones verticales</b>	
<b>Número de bits digitalizados</b>	8 bits excepto a 2 mV/div
<b>Rango de sensibilidad</b>	2 mV/Div a 5 V/Div en secuencia 1-2-5 con la atenuación de sonda establecida en 1X
<b>Límite de frecuencia inferior, CC acoplado</b>	≤ 10 Hz ≤ 1 Hz si se utilizan sondas pasivas 10X.
<b>Tiempo de subida, típico</b>	= 2,1 ns
<b>Especificaciones horizontales</b>	
<b>Rango de velocidades de muestra</b>	De 5 S/s a 2 GS/s

<b>longitud de registro</b>	2500 muestras por registro
<b>Rango segundos/división</b>	De 2.5 ns/div a 50 s/div, en una secuencia 1-2.5-5
<b>Salida de compensador de sonda</b>	
<b>Compensador de sonda, voltaje y frecuencia de salida, típicos</b>	Las características son las siguientes: Voltaje de salida 5.0 V $\pm$ 10% en 1 M $\Omega$ de carga Frecuencia 1 kHz
<b>Fuente de alimentación</b>	
<b>Fuente de voltaje</b>	Rango completo: De 100 a 240 V CA RMS $\pm$ 10%, Categoría de instalación II (cubre un rango de 90 a 264 V CA)
<b>Ambiental</b>	
<b>Temperatura</b>	De 0 °C a +50 °C, con gradiente máximo de 5 °C/minuto, sin condensación, hasta 3000 m de altitud
<b>Método de refrigeración</b>	Refrigeración por convección
<b>Humedad: en funcionamiento</b>	De 5% a 95% de humedad relativa (% de HR) hasta +40 °C
<b>Altitud</b>	Hasta 3000 metros
<b>Mecánicas</b>	
<b>Altura</b>	158.0 mm
<b>Ancho</b>	326.3 mm
<b>Fondo</b>	124.1 mm
<b>Peso</b>	2.0 kg

Tabla 4.1 Características del osciloscopio Tektronic TDS 2024C.

<b>SONDA DE ALTA TENSIÓN</b>	
<b>Marca</b>	<b>TEKTRONIC</b>
<b>Modelo</b>	<b>P6015A</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Especificaciones de adquisición</b>	
<b>Modos de adquisición</b>	Muestra, Detección de picos y Promedio
<b>Especificaciones de entrada</b>	
<b>Acoplamiento de entrada</b>	CC, CA o tierra
<b>Impedancia de entrada, CC acoplado</b>	1 M $\Omega$ $\pm$ 2% en paralelo con 20 pF $\pm$ 3 pF
<b>Especificaciones verticales</b>	
<b>Ambiental</b>	
<b>Temperatura</b>	De 0 °C a +50 °C, con gradiente máximo de 5 °C/minuto, sin

	condensación, hasta 3000 m de altitud
<b>Método de refrigeración</b>	Refrigeración por convección
<b>Humedad: en funcionamiento</b>	De 5% a 95% de humedad relativa (% de HR) hasta +40 °C
<b>Altitud</b>	Hasta 3000 metros
<b>Mecánicas</b>	
<b>Altura</b>	158.0 mm
<b>Ancho</b>	326.3 mm
<b>Fondo</b>	124.1 mm
<b>Peso</b>	2.0 kg

Tabla 4.2 Características de la sonda de alta tensión Tektronic P6015A.

*b. Frecuencia*

La frecuencia de entrada es otro de los parámetros fundamentales tanto en la generación de plasma como en sus características.

Dependiendo del equipo de amplificación de tensión y de la carga capacitiva del circuito conectado al amplificador se podrá alcanzar una frecuencia u otra para un determinado voltaje.

En la figura 4.3 (Trek, INC, 2012) se representan las curvas correspondientes al equipo de amplificación Trek modelo 10/10B-HS.

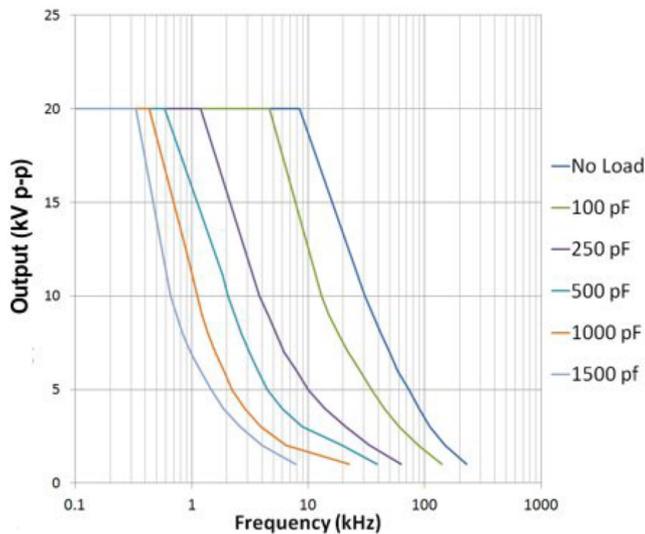


Figura 4.3 Curvas frecuencia/voltaje del Trek 10/10B-HS.

En función del voltaje aplicado se obtiene una u otra frecuencia pero en conjunto se han utilizado los siguientes rangos de frecuencia

- Trek modelo 10/10B-HS que abarca el rango de 1 a 2 kHz.
- GBS elektronik modelo Minipuls 4 de 1 a 10 kHz.

*c. Amperaje*

El amperaje es otro de los parámetros que tienen importancia tanto en la producción de plasma como en las características de éste. Lamentablemente en el amplificador Trek 10/10B-HS de nuestro sistema no puede fijar un amperaje determinado, fijándose el amperaje máximo. El amperaje máximo con el que permite trabajar el Trek 10/10B-HS de forma estable es de 40 mA. Por lo que a pesar de ser una variable de entrada será tratada como una variable dependiente.

En cuanto al GBS elektronik modelo Minipuls 4 el amperaje máximo de salida es de 220 mA no pudiéndose ser seleccionado manualmente un amperaje determinado. Pero debido a la inestabilidad de este sistema esta variable no será medida.

El amplificador Trek 10/10B-HS dispone de una salida BNC que se conecta directamente al osciloscopio descrito anteriormente.

*d. Grosor del dieléctrico*

El dieléctrico elegido en nuestro caso es el PTFE (Politetrafluoretileno) que además de tener una constante dieléctrica de 2.1 y una rigidez dieléctrica de 20 a 70 kV/mm es un plástico químicamente muy inerte, si bien, es verdad que tiene compuestos fluorados, por lo que cuando se encuentra inmerso en plasma podría generar compuestos volátiles tóxicos. En todo caso, este compuesto también está recomendado en la tesis “Cold atmospheric plasma decontamination against nosocomial bacteria” (Klämpfl, 2014).

Las características técnicas del PTFE utilizado son las siguientes:

Propiedades	Métodos de ensayo ASTM	Unidades	Valor
<b>Propiedades mecánicas</b>			
Resistencia a la tracción a 23° C	D 638	kg/cm <sup>2</sup>	200-300

<b>Resistencia al alargamiento con ruptura a 23° C</b>	D 638	%	200-300
<b>Resistencia a la comprensión</b>	D 695	kg/cm <sup>2</sup>	70
<b>Dureza Shore</b>	D 676		I D 55-63
<b>Rigidez (3 mm)</b>	D 747	kg/cm <sup>2</sup>	4200
<b>Deformación bajo carga para una presión de 4,5 kg/cm<sup>2</sup> en función de la temperatura</b>	D 648	°C	120
<b>Densidad</b>	D 792	g/cm <sup>3</sup>	2.14-2.2
<b>Coefficiente de fricción</b>			0.01-0.2*)
<b>Absorción al agua</b>	D 570	%	0
<b>Resistencia a la intemperie</b>			excelente
<b>Propiedades térmicas</b>			
<b>Temperatura de empleo</b>			
<b>Máximo</b>		°C	+ 260
<b>Mínimo</b>		°C	-190
<b>Temperatura específica</b>		kcal/kg °C	0.25
<b>Coefficiente de dilatación térmica lineal (Valor aproximado para un grado centígrado)</b>			10-10 <sup>-5</sup>
<b>Conductibilidad térmica</b>	D 696	kcal/h m °C	0.21
<b>Inflamabilidad</b>	D 635	cm/min	Incombustible
<b>Propiedades eléctricas</b>			
<b>Rigidez dieléctrica, tiempo corto</b>	D 189 a	kV/mm	20-40
<b>Resistencia superficial al arco</b>	D 495	sec	700
<b>Resistencia superficial para humedad relativa de 100</b>	D 257	Ohm	> 1013
<b>Resistencia específica</b>	D 257	Ohm.cm	> 1016
<b>Constante dieléctrica para:</b>	D 150		

<b>50 Hz</b>			2.1
<b>103 Hz</b>			2.1
<b>105 Hz</b>			2.1
<b>106 Hz</b>			2.1
<b>Factor pérdida a:</b>	D 150		
<b>50 Hz</b>			$< 10^{-4}$
<b>103 Hz</b>			$< 10^{-4}$
<b>105 Hz</b>			$< 10^{-4}$
<b>106 Hz</b>			$< 10^{-4}$
(*) El coeficiente de fricción depende de la velocidad, de la presión superficial, de la materia, y de la superficie de contacto sobre la que tiene lugar el frotamiento. El coeficiente de frotamiento aumenta con la velocidad y disminuye cuando la presión aumenta.			

**Tabla 4.3 Características técnicas del PTFE.**

Es interesante, debido a la importancia que ha tenido en el diseño de los electrodos SMD realizar unos breves comentarios sobre el parámetro de rigidez dieléctrica que poseen los medios dieléctricos.

#### **Rigidez dieléctrica:**

“Máximo campo eléctrico que no ioniza las moléculas de un dieléctrico. Los campos eléctricos de pequeño módulo polarizan los dieléctricos; o sea, orientan sus moléculas sin arrancar electrones de sus átomos. No producen, por tanto, corrientes de conducción en el dieléctrico, salvo las que puedan deberse a los pocos electrones libres que pueda haber. Pero, si aumenta el módulo del campo eléctrico, puede llegar a arrancar electrones ligados y, por tanto, a ionizar las moléculas del dieléctrico. Entonces el dieléctrico se hace conductor debido a los electrones que el campo ha arrancado, que pasan a ser libres, la corriente crece bruscamente y suele dañar al dieléctrico por elevación de su temperatura. Esa corriente se llama corriente disruptiva. El mayor valor del campo eléctrico que no produce este incremento brusco de corriente es la rigidez dieléctrica. Por eso una definición práctica de rigidez dieléctrica puede ser

máximo campo eléctrico que puede soportar un dieléctrico sin perder sus propiedades aislantes.

La rigidez dieléctrica del aire seco es 30 kV/cm. Por encima de este valor se produce arco eléctrico. (Quintela et al., 2006).

La rigidez dieléctrica del PTFE depende de:

- Espesor de material: Conforme aumenta el espesor de material disminuye la rigidez dieléctrica (Kim et al., 2001), (Syed, 2001).
- La temperatura del material: Para cualquier espesor la rigidez dieléctrica disminuye conforme aumenta la temperatura a la que se encuentra el material (Kim et al., 2001), (Syed, 2001).
- Condiciones ambientales: Tales como la exposición a oxidación, ozono, radiación y químicos disminuyen la rigidez dieléctrica (Syed, 2001).
- Defectos físicos del material: Impurezas en el material tales como contaminantes disminuyen la rigidez dieléctrica del material, esto se liga especialmente con la disminución de la rigidez dieléctrica con el espesor (Syed, 2001).
- Material de los electrodos: Diferentes metales de los electrodos producen en el dieléctrico ligeras diferencias en la rigidez dieléctrica (Syed, 2001).
- Tamaño del área de los electrodos: Los electrodos con gran superficie producen en los dieléctricos valores más bajos de rigidez dieléctrica (Syed, 2001).
- Forma de los electrodos: Dependiendo de la configuración de los electrodos, el gradiente del voltaje presente puede ser no uniforme, pudiéndose producir concentración forzando al estrés eléctrico a concentrarse en regiones específicas, rompiendo en esos puntos al dieléctrico con anterioridad al resto de la superficie (Syed, 2001).
- Método de aplicación del voltaje: Otro factor que afecta a la rigidez dieléctrica es la forma en la que se aplica el incremento del voltaje, si se hace de forma continua o paso a paso. Una elevación lenta del voltaje puede

conllevar al aumento local de temperatura con el tiempo disminuyendo así por degradación térmica la rigidez dieléctrica, mientras que una rápida aplicación del voltaje, promueve conducción electrónica dando valores cercanos a los que se alcanzaría por rotura intrínseca del dieléctrico (Syed, 2001).

- Frecuencia: El calor generado en un dieléctrico es directamente proporcional a la frecuencia aplicada. De este modo a altas frecuencias se produce una disminución de la rigidez dieléctrica. A altas frecuencias la rigidez dieléctrica depende mucho de la geometría y disposición de los electrodos, del ambiente donde se encuentra y en menor medida del material (Syed, 2001).

Este parámetro es muy importante porque ha condicionado en gran medida la elección de espesores de los dieléctricos de PTFE y los voltajes, frecuencias y humedad posibles en nuestro sistema.

En el sistema internacional se mide en V/m.

Los grosores de PTFE disponibles son 0.5, 1 y 1.5 mm.

*e. Humedad al inicio de la producción del plasma*

Antes del inicio de la producción de plasma se debe de crear en el interior de la cámara, una atmósfera perfectamente controlada, por lo que con el sistema de generación de gases se inyecta aire cero a una humedad determinada. Los componentes del gas son los generados por el aire cero. Hay una clara influencia de este parámetro tanto en la producción de plasma como en la inactivación de bacterias de ahí su importancia en procesos de descontaminación biológica (Patil et al., 2014).

Esta humedad se mide directamente con una sonda de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110 antes del comienzo de la producción de plasma.



Figura 4.4 Sonda de humedad Vaisala HMP110

Las características de esta sonda son:

<b>SONDA DE HUMEDAD</b>	
<b>Marca</b>	<b>Vaisala</b>
<b>Modelo</b>	<b>HMP110</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Rendimiento humedad relativa</b>	
<b>Rango de medición</b>	0 ... 100 %HR
<b>Precisión (incluye no linealidad, histéresis y repetitividad)</b>	
<b>Rango de temperatura 0 ... +40 °C</b>	
<b>0 ... 90 %HR</b>	±1.5 %RH
<b>90 ... 100 %HR</b>	±2.5 %RH
<b>Rango de temperatura -40 ... 0 °C, +40 ... +80 °C</b>	
<b>0 ... 90 %HR</b>	±3.0 %RH
<b>90 ... 100 %HR</b>	±4.0 %RH
<b>Incertidumbre de calibración de fábrica (+20°C)</b>	±1.5 %RH
<b>Sensor de humedad</b>	Vaisala HUMICAP180 R®
<b>Estabilidad</b>	±2 %HR mas de 2 años
<b>Entradas y salidas</b>	
<b>Voltaje de operación</b>	5 ... 28 VCC / 8 ... 28 VCC con salida de 5 V 8 ... 28VCC con convertidor de corriente

<b>Consumo de corriente</b>	1 mA promedio, pico máx. 5 mA
<b>Tiempo de encendido</b>	2 s
<b>Salidas</b>	
<b>2 canales</b>	... 1 VCC/0 ... 2,5 VCC / 0 ... 5 VCC/1 ... 5 VCC
<b>1 Canal convertidor de corriente</b>	4 ... 20 mA
<b>Ambiente de operación</b>	
<b>Temperatura de operación</b>	-40 ... +80 °C
<b>Características mecánicas</b>	
<b>Materiales</b>	
<b>cuerpo</b>	acero inoxidable (AISI 316)
<b>filtro de rejilla</b>	plástico ABS recubierto de cromo
<b>cable</b>	poliuretano o FEP
<b>Clasificación de caja</b>	IP65
<b>Rosca del cuerpo</b>	M12x1 / 10 mm
<b>Conector de cable</b>	M8 de 4 pines (IEC 60947-5-2)
<b>Peso sonda</b>	17 g
<b>Peso con cable de 0,3 m</b>	28 g
<b>Dimensiones</b>	
<b>Largo</b>	71 mm
<b>Diámetro</b>	12 mm

Tabla 4.4 Características de la sonda de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110



Figura 4.5 Detalle de colocación de sonda de humedad Vaisala HMP110 en el interior de la cámara

*f. Tiempo de producción de plasma*

El tiempo de producción del plasma se mantiene en todos los experimentos a 120 s.

**4.1.2. Parámetros de entrada del sistema APPJ-NTP**

Los parámetros de entrada para el sistema APPC-NTP son: Voltaje, frecuencia, amperaje, tipo de gas inyectado, caudal del gas inyectado, humedad del gas inyectado. Veamos ahora cada uno de estos parámetros.

*a. Voltaje*

Es importante recordar que este sistema se utiliza para aplicar plasma directamente sobre las superficies que se quieren descontaminar por lo que la distancia de la superficie a descontaminar a la salida del APPJ-NTP debe de estar dentro del alcance del plasma. Por ello el voltaje aplicado no debe de ser excesivamente alto ya que en caso contrario a distancias de 1 ó 2 cm se produciría un arco eléctrico por ruptura dieléctrica del aire, en todo caso no superaremos en ningún caso los 20 kV por lo que en esta tesis solo se utilizará el equipo Trek 10/10 B-HS. En nuestro caso, el sistema produce plasma dentro del rango de voltaje comprendido entre 8.2 y 20.4 kV.

*b. Frecuencia*

Mirar lo descrito en el punto 4.1.1. en lo referente a la frecuencia. El rango en el que se ha trabajado en esta tesis para este sistema varía entre 1 y 8 kHz en función del voltaje aplicado.

*c. Amperaje*

Mirar lo descrito en el punto 4.1.1. en lo referente al amperaje en el equipo de amplificación de voltaje Trek 10/10 B-HS.

*d. Diámetro del electrodo de potencia*

El diámetro del electrodo de potencia es otra variable del sistema, en función de este diámetro existirá una distancia u otra entre dicho electrodo y tubo dieléctrico de cuarzo, cambiando por lo tanto el volumen de cilindro donde se produce el plasma y la velocidad de

paso del aire cero por dicho cilindro para un caudal determinado (ecuación de continuidad de fluidos ideales).

*e. Tipo de gas inyectado*

El tipo de gas inyectado es fundamental tanto en la producción de plasma como en las características de éste. En función del tipo de gas inyectado se tendrán unas especies reactivas u otras. Para el desarrollo de esta tesis se ha inyectado aire cero compuesto de 79 % de N<sub>2</sub> y 21 % de O<sub>2</sub>. No se han cambiado las concentraciones puesto que el sistema sólo permite hacerlo aumentando la concentración de O<sub>2</sub> en la mezcla, lo que pondría en riesgo la seguridad en el laboratorio. Este gas ha sido elegido debido a la facilidad de producirlo en cualquier lugar con un coste asequible.

*f. Caudal del gas inyectado*

El caudal del gas inyectado es otra variable importante en este tipo de sistemas, la variación del caudal permite:

- La producción continua de plasma en el interior del jet.
- La proyección del plasma al exterior del jet.
- La refrigeración tanto del jet como de la muestra que se quiera irradiar ya sea un tejido vivo o material sensible tratando que se mantenga a temperatura ambiente o ligeramente por encima de ésta.

En esta tesis se han utilizado caudales entre 5 l/min y 25 l/min.

*g. Humedad del gas inyectado*

La humedad es otra variable a considerar tanto en la producción de plasma en este tipo de sistemas como en sus características. Los cambios de humedad en el aire implican directamente cambios del H<sub>2</sub>O en aire lo que implica la aparición en mayor o menor medida de otras especies reactivas en el plasma que facilitarán en menor o mayor grado la descontaminación biológica de tejidos o equipos sensibles.

Hay una clara influencia de este parámetro tanto en la producción de plasma como en la inactivación de bacterias de ahí su importancia en procesos de descontaminación biológica (Patil et al., 2014).

La humedad se mide directamente en la salida del sistema de gases con la sonda de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110 descrita anteriormente.

*h. Tiempo de producción de plasma*

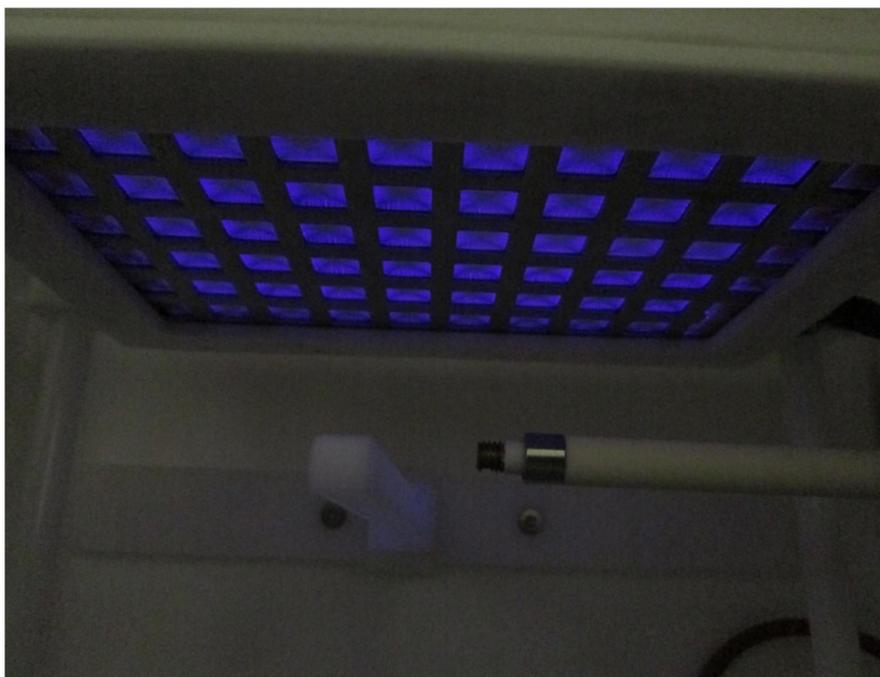
El tiempo de aplicación del plasma se mantiene durante todos los experimentos a 120 s.

## **4.2. Parámetros de salida**

Las variables o parámetros de salida más relevantes en la producción de plasma difieren para el prototipo APPC-NTP y para el APPJ-NTP, aunque tienen en común algunas de ellas. Por lo que este punto lo desarrollaremos indicando que parámetros hemos tenido en cuenta en cada prototipo y los equipos de medida utilizados.

### **4.2.1. Parámetros de salida del sistema APPC-NTP**

Las variables que se han medido a la salida del sistema APPC-NTP han sido: especies generadas en el plasma, temperatura de la muestra, la temperatura en el interior de la cámara y la humedad de la cámara.



**Figura 4.6** Imagen de generación de plasma en el sistema APPC-NTP

*a. Especies generadas en el plasma*

Las especies reactivas generadas en el plasma y su cantidad dependen entre otras cosas del tipo de gas inyectado, de la humedad de éste, de la frecuencia, la tensión y la intensidad de corriente aplicada.

Las especies excitadas generadas en aire en electrodos SMD y sus espectros se pueden encontrar en diversos artículos (Morfill et al., 2009), (Zimmermann et al., 2011), (Klämpfl et al, 2012), y en la tesis (Klämpfl, 2014).

En el artículo “Nosocomial infections – a new approach towards preventive medicine using plasmas” (Morfill et al., 2009) cita la creación de especies reactivas del oxígeno y el nitrógeno por interacción con el aire y el vapor de agua tales como O, N, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, y O<sub>3</sub>.

En el artículo “Cold Atmospheric Air Plasma Sterilization against Spores and Other Microorganisms of Clinical Interest” (Klämpfl et al, 2012) se cita para equipos con electrodos SMD en aire la creación de moléculas ROS (Reactive Oxygen Species), RNS (Reactive Nitrogen Species) y NOS (Oxygen and Nitrogen Species), como radicales libres reactivos (NO, OH, superóxidos O<sub>2</sub><sup>-</sup>) o agentes fuertemente oxidantes como (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, y O<sub>3</sub>)

En el artículo “Effects of cold atmospheric plasmas on adenoviruses in solution” (Zimmermann et al., 2011) cita la creación de picos pequeños en la región del espectro UVC correspondientes con el NO y otros picos en la región UVA correspondientes a moléculas de nitrógeno concretamente N<sub>2</sub> 2nd positivo. Por otro lado la química del aire en no equilibrio iniciado por las micro-descargas de plasma disocia las moléculas de O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en oxígeno y nitrógeno atómico como reacción básica, lo que permite la creación de ozono (O<sub>3</sub>) a partir de la reacción:



En este artículo también hace referencia a la creación en su sistema de OH, NO, O<sub>2</sub><sup>\*</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> etc, y comenta que en la micro-descarga se producen más de 600 reacciones químicas en el aire que

involucran el oxígeno, el nitrógeno y el vapor de agua según otros autores.

En la tesis con título “Cold atmospheric plasma decontamination against nosocomial bacteria” (Klämpfl, 2014) se cita que las especies típicas en el plasma producido en electrodos SMD en aire húmedo son  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $OH$ ,  $N_2^+$ ,  $O_2^*$ ,  $H_2O_2$ . Además en esta tesis se dedica un apartado completo a la química del ozono en aire y en aire con humedad, cosa que en la presente tesis no se va a detallar. Sin embargo como especies reactivas se realiza un análisis del plasma mediante espectrometría óptica de emisión (OES: Optical Emission Spectrum) apareciendo de forma dominante estados excitados de la molécula de  $N_2$ . Un resumen de las especies químicas que aparecen mediante OES se puede ver en la tabla 4.5 (Klämpfl, 2014):

Especie química	Rango de longitud de onda (nm)
$N_2$ (2nd+)	280 - 497
$N_2$ (1st+)	640 - 780
$N_2$ (4th+)	220 – 280
$NO$ ( $\gamma$ )	~ 247
$OH$	308
$O_3$	328
$O_2$ singlete	762
$O$ atómico	777

**Tabla 4.5 Especies relevantes en el plasma y sus longitudes de onda.**

De los anteriores artículos y de que en nuestro caso inyectamos aire cero tendremos principalmente especies ROS (Reactive Oxygen Species), RNS (Reactive Nitrogen Species) y NOS (Oxygen and Nitrogen Species) además debido a la existencia de humedad en el aire ( $H_2O$ ), tendremos especies con H, con ello podemos deducir que con el APPC-NTP de la tesis es de esperar que se produzcan las siguientes especies reactivas principalmente:

$N_2$ ,  $NO$ ,  $O_2$ ,  $O$ ,  $O_3$  y con aire húmedo  $OH$ ,  $H_2O_2$

Las especies reactivas generadas en el plasma se van a medir mediante espectrometría de emisión óptica (OES).



Figura 4.7 Espectrómetro Ocean Optics Maya 2000 Pro.

<b>ESPECTRÓMETRO</b>	
<b>Marca</b>	<b>Ocean Optics</b>
<b>Modelo</b>	<b>Maya 2000 Pro</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Especificaciones detector CCD</b>	
<b>Detector</b>	Hamamatsu S10420, back-thinned FFT-CCD
<b>Refrigeración termoelectrica</b>	No
<b>Número de pixeles</b>	Todos: 2068 x 70. Activos: 2048 x 64
<b>Rango espectral</b>	200-1100 nm con ventana, Opcional UV (150nm). 175-1100 nm con HC1 grating
<b>Tamaño de pixel</b>	14 $\mu\text{m}^2$
<b>Profundidad de pozo del pixel</b>	200 Ke-
<b>Altura de columna</b>	896 $\mu\text{m}^2$
<b>Área activa de detección (mm)</b>	28.672 horizontal x 0.896 vertical
<b>Eficiencia cuántica: Pico QE QE @ 250 nm</b>	75% a 600 nm 60%
<b>Especificaciones del espectrómetro</b>	
<b>Dimensiones (LxWxH)</b>	148.6 mm x 109.3 mm x 50.4 mm
<b>Peso</b>	0.96 kg
<b>Temperatura de operación</b>	-0 °C to +50 °C
<b>Humedad</b>	0 – 90% sin condensación
<b>Consumo de potencia</b>	500 mA @ 5 VDC
<b>Voltaje de alimentación</b>	4.5 – 5.5 V
<b>Tiempo de encendido</b>	~ 2s dependiendo del tamaño del código
<b>Rejillas</b>	14 rejillas disponibles

<b>Abertura de entrada</b>	5, 10, 25, 50, 100 o 200 $\mu\text{m}$ anchuras de abertura
<b>Filtros Orden-Clasificación</b>	6 OF series disponibles
<b>Longitud focal de entrada</b>	f/4, 101 mm
<b>Resolución óptica (FWHM)</b>	Depende del tamaño de la rejilla y de la abertura de entrada
<b>Perdida de luz</b>	<0.05% at 600 nm; <0.10% at 435 nm
<b>Convertidor A/D</b>	16 bit, 150 kHz+
<b>Rango dinámico</b>	
<b>Spec</b>	8000:1
<b>Típico</b>	12000:1+
<b>Razón señal/ruido</b>	450:1
<b>No linealidad</b>	
<b>No corregida</b>	~10.0%
<b>Corregida</b>	<1.0%
<b>Conector de fibra óptica</b>	SMA 905 de fibra óptica de una hebra (0.22 NA)
<b>Tiempo de integración</b>	6 ms to 5 s
<b>Interfaces</b>	USB 2.0

Tabla 4.6 Características del espectrómetro Ocean Optics modelo Maya 2000 Pro



Figura 4.8 Detalle de colocación del coseno corrector del Espectrómetro Ocean Optics Maya 2000 Pro.

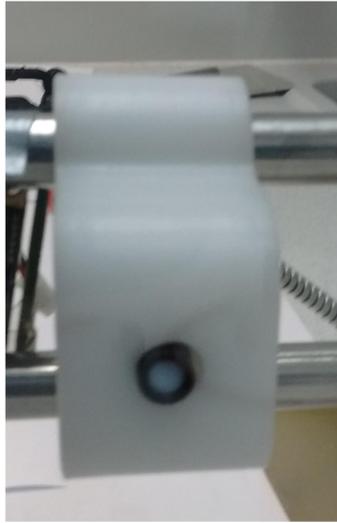


Figura 4.9 Detalle de colocación del coseno corrector del Espectrómetro Ocean Optics Maya 2000 Pro.

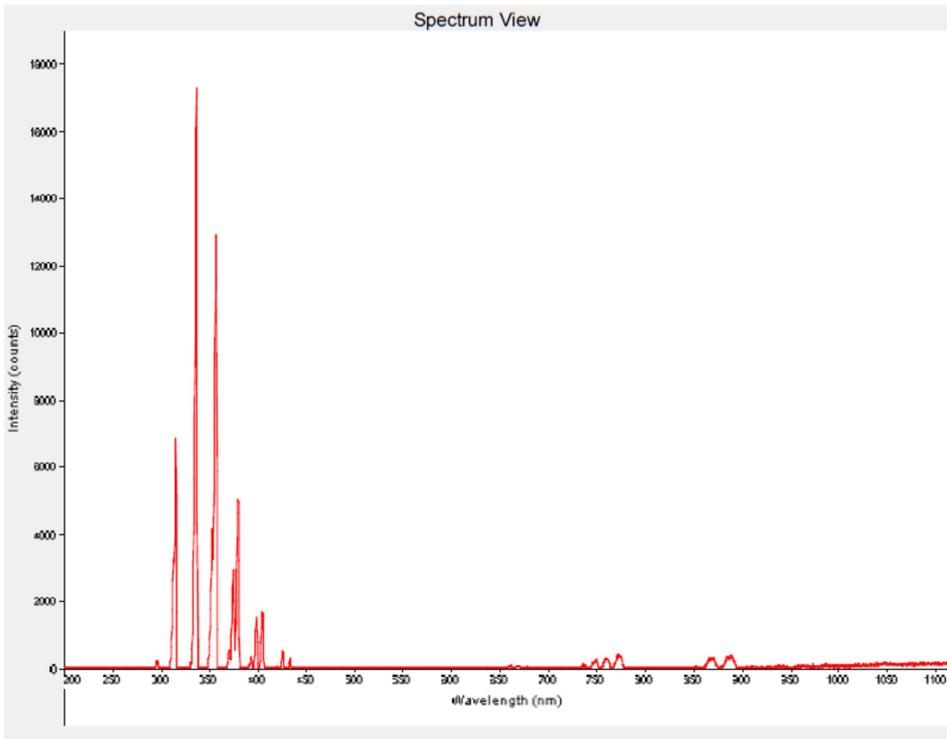


Figura 4.10 Espectro de emisión adquirido con el espectrómetro y el programa OceanView.

Realmente se van a estudiar los picos que aparecen en los espectros de emisión obtenidos con el espectrómetro óptico de Ocean Optics modelo Maya 2000Pro, un equipo de la misma marca aunque otro modelo aparece en la bibliografía citada en esta tesis (Patil et al., 2014), esto es debido a que por el equipamiento disponible y al diseño experimental únicamente se pueden obtener espectros de emisión óptica por lo que en esta tesis se estudiarán las diferentes longitudes de onda de este espectro, seleccionando los picos que aparecen de forma evidente en todos los espectros. De estos picos el Programa OceanView nos puede dar los siguientes parámetros: Peak X value: Longitud de onda del pico en nm., la FWHM del pico, la FWQM del pico, el centro del pico en nm, el centroide en nm, el enclosing: ancho de banda del 90% en nm, la integral o área bajo pico en cuentas y la Peak Y value: altura de pico en cuentas.

De todos estos parámetros vamos a analizar únicamente como variables de salida del sistema las siguientes:

- La longitud de onda del pico (en nm).
- La altura de pico es decir la intensidad del pico (altura de pico en cuentas).
- La integral del pico es decir el área que hay bajo el pico es decir el número de cuentas que hay bajo el pico.

Peak X Value	Wavelength FWHM	Wavelength FWQM	Center Wavelength	Enclosing Width	Centroid	Integral	Peak Y Value
295,918	3,262	4,41	296,481	2,797	296,44	343,72	109,08
296,384	3,262	4,41	296,481	2,796	296,44	343,72	109,08
314,535	4,084	5,91	314,655	3,719	314,347	18,416,162	4,440,94
335,888	3,707	5,26	336,185	3,708	335,946	44,416,224	11,549,054
356,716	4,097	7,159	356,507	5,547	355,737	42,225,62	9,038,417
379,328	3,643	9,208	379,423	7,834	377,352	21,740,55	3,770,405
404,626	3,35	4,572	404,953	9,185	401,394	7,873,681	1,163,314
425,716	3,204	4,211	426,044	2,746	426,028	915,551	291,048
660,317	3,1	4,384	660,833	2,657	660,7	131,551	43,637
660,76	3,1	4,384	660,833	2,657	660,7	131,551	43,637
773,62	6,725	8,7	772,735	6,968	772,704	2,315,198	346,43
868,752	8,59	11,042	868,381	8,587	868,413	2,240,763	260,742
888,472	9,392	12,063	887,393	10,273	887,196	3,052,517	325,777
910,267	3,952	8,186	911,481	5,546	911,653	57,875	12,694
939,639	7,028	11,51	939,722	170,355	1,050,501	12,081,625	32,635
940,063	7,028	11,51	939,722	170,355	1,050,501	12,081,625	32,635
965,072	12,723	158,005	963,768	150,402	1,053,07	11,799,27	48,116
986,191	14,016	134,457	988,832	150,402	1,053,07	11,799,27	69,469
998,829	133,578	136,148	1,047,15	150,402	1,053,07	11,799,27	58,757
1.047,045	82,927	133,468	1.072,476	126,98	1,053,141	11,790,735	126,826
1.109,391	82,841	133,435	1.072,518	122,276	1,053,141	11,790,735	129,616

Figura 4.11 Parámetros de los picos obtenidos con el programa OceanView.

Por otro lado los espectros obtenidos se pasarán por un programa de espectrometría para la búsqueda e identificación de líneas atómicas y bandas moleculares (PLASUS SpecLine) con el fin de intentar relacionar los picos identificados por el programa OceanView del espectrómetro con alguna especie reactiva.

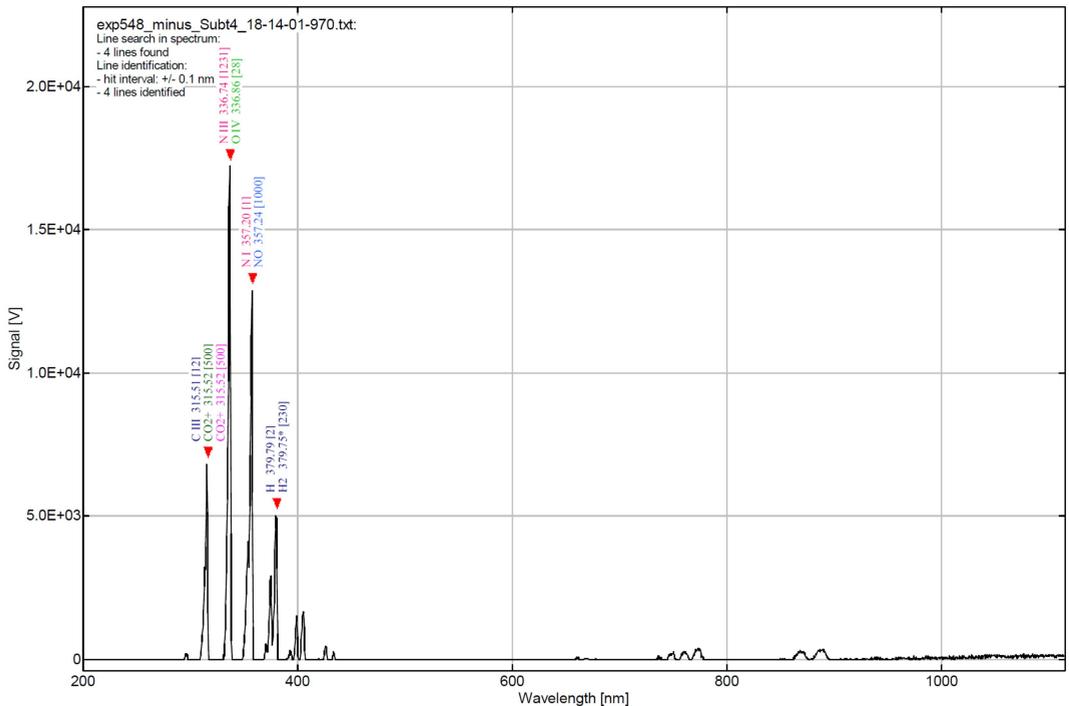


Figura 4.12 Identificación de picos con el programa Plaus Specline.

### b. Temperatura de la muestra

Aunque la temperatura de la muestra no es un parámetro característico del plasma, en nuestro caso debido a la aplicación que se le desea dar al plasma que es la desinfección de material especialmente sensible y de material biológico, es importante que la temperatura a la que se somete la muestra o el material se mantenga lo más bajo posible no debiendo de superar los 70 °C, por otro lado conocer la temperatura permite asegurar que la desinfección no se produce por efecto térmico sino por efecto del plasma, por lo que en esta tesis es un parámetro importante a controlar. El control de dicho parámetro se realiza mediante un termómetro de infrarrojos de la

marca Calex modelo Pyromini-C-151 que enfoca directamente sobre el soporte de la muestra.



Figura 4.13 Termómetro de infrarrojos Calex electronics modelo Pyromini C-151.

Las características de este equipo se muestran en la siguiente tabla:

<b>TERMÓMETRO POR INFRARROJOS</b>	
<b>Marca</b>	<b>Cálex electronics limited</b>
<b>Modelo</b>	<b>Pyromini-C-151</b>
<b>Características técnicas</b>	
<b>Generales</b>	
<b>Rango de temperatura</b>	Configurable -20 a 1000
<b>Salida</b>	De 4 a 20 mA
<b>Visión de campo</b>	
<b>Precisión</b>	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ o 1% el mayor de los dos

<b>Reproducibilidad</b>	0.5 °C ó 0.5% el mayor de los dos	
<b>Tiempo de respuesta <math>t_{90}</math></b>	240 ms (90% de la respuesta)	
<b>Rango espectral</b>	8 a 14 $\mu\text{m}$	
<b>Voltaje de alimentación</b>	24 V DC $\pm$ 5 %	
<b>Mecánicas</b>		
	<b>Sensor</b>	<b>Módulo electrónico</b>
<b>Construcción</b>	Acero inox 316	Aluminio
<b>Dimensiones</b>	$\Phi$ 18 x 45 mm	98(w)x 64(h) x36(d) mm
<b>Montaje</b>	Rosca M16 x 1 mm	2 tornillos M4
<b>Condiciones ambientales</b>		
	<b>Sensor</b>	<b>Módulo electrónico</b>
<b>Protección ambiental</b>	IP65 (NEMA 4)	-
<b>Temperatura</b>	0 °C a 60 °C	0 °C a 60 °C
<b>Humedad</b>	Máxima 95% no condensada	Máxima 95% no condensada
<b>Pantalla táctil</b>		
<b>Formato pantalla</b>	TFT color 320 x 240 pixeles	

Tabla 4.7 Características del termómetro Calex modelo Pyromini-C-151

Detalle del montaje realizado para medir la temperatura de la superficie se muestra en la figura siguiente.



Figura 4.14 Detalle de la sonda de temperatura de infrarrojos en el interior de la cámara



**Figura 4.15** Ubicación de la sonda de temperatura de infrarrojos en el interior de la cámara.

*c. Temperatura del interior de la cámara de irradiación*

Aunque la temperatura del interior de la cámara no es un parámetro característico del plasma, en nuestro caso debido a la aplicación que se le desea dar al plasma que es la desinfección de material especialmente sensible y de material biológico, es importante que la temperatura del interior de la cámara se mantenga lo más bajo posible no debiendo de superar los 70 °C, por otro lado conocer la temperatura permite asegurar que la desinfección no se produce por efecto térmico sino por efecto del plasma, por lo que en esta tesis es un parámetro importante a controlar. El control de dicho parámetro se realiza mediante un termopar PT100 ubicado en el interior de la cámara.

*d. Humedad de la cámara durante la generación del plasma*

Aunque la humedad de la cámara durante la irradiación no es un parámetro característico del plasma, es interesante conocerla puesto que permite conocer en todo momento la influencia del agua en la producción de plasma, también nos permite conocer su comportamiento y evolución durante todo el tiempo de producción de plasma, en nuestro caso la controlamos con la sonda de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110 descrita anteriormente.

### 4.2.2. Parámetros de salida del sistema APPJ-NTP

Las variables que se han medido a la salida del sistema APPJ-NTP han sido: especies generadas en el plasma, temperatura de la muestra irradiada.



Figura 4.16 Imagen de producción de plasma con el sistema APPJ-NTP

#### a. Especies generadas en el plasma

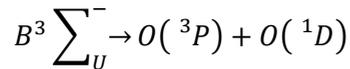
Las especies reactivas generadas en el plasma y su cantidad dependen entre otras cosas del tipo de gas inyectado, de la humedad de éste, de la frecuencia, la tensión y la intensidad de corriente aplicada.

Las especies reactivas generadas en aire y los espectros se pueden encontrar en diversos artículos, (Lu et al., 2008), (Lu et al., 2009), (Hayashi et al., 2013), (Patil et al., 2014).

En el artículo “A simple atmospheric pressure room-temperature air plasma needle device for biomedical applications” (Lu et al., 2009) estudian las especies excitadas presentes en el plasma midiendo el espectro de emisión de este y encuentran las siguientes: OH, O,  $N_2(C-B)$ ,  $N_2^+(B-X)$ , NO, H,  $N_2(B-A)$  e incluso N. En nuestro caso el OH sólo es de esperar que aparezca cuando el aire contenga agua, es decir cuando introduzcamos en el APPJ-NTP aire húmedo.

En el artículo “Inactivation characteristics of *Bacillus thuringiensis* spore in liquid using atmospheric touch plasma using oxygen” (Hayashi et al., 2013), nos muestra el espectro de emisión de la antorcha de plasma con aire y oxígeno apareciendo principalmente

los estados excitados  $N_2$  2nd positivo y  $N_2$  1st negativo y en el caso del oxígeno aparece el pico de 777 nm correspondiente al  $O(^3P)$  y otro pico menor correspondiente al  $O(^1D)$ . Esto es debido a que los electrones de alta energía generados en la descarga atmosférica, la molécula de  $O_2$  que se encuentra en estado fundamental se excita a  $B^3\Sigma_u^-$  generando y ocurre la reacción:



En este caso también aparecerá  $H_2O_2$  debido a la disociación del  $H_2O$  por las partículas neutras de alta velocidad existentes en el plasma,  $OH$ ,  $N_2O$  y  $O_3$ . En nuestro caso también aparecerán en el aire cuando inyectemos aire húmedo.

En el artículo “Influence of high voltage atmospheric cold plasma process parameters and role of relative humidity on inactivation of *Bacillus atrophaeus* spores inside a sealed package” (Patil et al., 2014), aunque el equipo de este artículo no es de tipo jet si es tipo DBD trabajando en aire por lo que es de interés en cuanto a especies reactivas se refiere. En este artículo se estudian las especies reactivas a través de espectrometría óptica de absorción mientras que nosotros lo hacemos a través de espectrometría óptica de emisión, pero es interesante reflejar que la especies reactivas que aparecen son el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), el ozono ( $O_3$ ) y otras especies reactivas del oxígeno como el  $^1O_2^*$  y el  $^*O_2^-$ , el hidróxido ( $OH$ ), peróxidos ( $H_xO_y$ ) en particular  $H_2O_2$  y óxidos de nitrógeno como ( $NO$ ,  $N_2O_5$ ,  $N_2O_4$ ) y posiblemente el  $HNO_4$  y el  $HONO$ . Todas estas especies se esperan que conformen el plasma en el equipo APPJ-NTP que no deja de ser un equipo DBD.

De los artículos anteriores se puede deducir que las especies reactivas que se van a producir en el plasma APPJ-NTP con toda probabilidad serán:  $O$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $N_2(C-B)$ ,  $N_2^+(B-X)$ ,  $NO$ ,  $N_2(B-A)$ ,  $N$  y cuando inyectemos aire cero húmedo aparecerán también  $OH$ ,  $H_2O_2$  y  $H$ , aunque no todas ellas seremos capaces de detectarlas mediante espectrometría de emisión óptica (OES)

El equipo utilizado para la medida de los espectros es el mismo que el utilizado en el equipo APPC-NTP el Ocean Optics Maya 2000Pro.

Para la toma del espectro el APPJ-NTP se enfrenta con el coseno corrector del espectrómetro interponiendo un cristal de cuarzo entre ambos.

El análisis espectral que se realiza es el mismo que en el descrito para el sistema APPC-NTP por los mismos motivos que los explicados en dicho punto.

*b. Temperatura de la muestra*

Como en el caso del APPC-NTP la temperatura de la muestra no es un parámetro intrínseco del plasma, pero como la aplicación del equipo es la de descontaminar biológicamente tanto tejido vivo como material especialmente sensible, es un parámetro importante a tener en cuenta, ya que de subir mucho la temperatura haría imposible su aplicación en estos campos.

Para ello se direcciona la sonda de temperatura sobre el cristal de cuarzo donde se colocaría la muestra a descontaminar y se toma su temperatura. La temperatura que alcanza el cristal de cuarzo es el mismo que la que alcanzaría la superficie de la muestra.



# Capítulo 5:

## Metodología empleada

### 5.1. Metodología empleada en la toma de datos.

La metodología empleada en la toma de los datos de los parámetros a medir ha sido distinta para el sistema APPC-NTP que para el sistema APPJ-NTP debido, a que en los dos sistemas no es posible instrumentar al mismo tiempo todos o la mayoría de parámetros a medir. Los factores principales de este motivo son:

- Modo de producción de plasma.
- Tamaño del equipo de producción de plasma.
- Tipo de parámetros a medir y localización de cada uno de los sensores.
- Distribución geométrica de los equipos.
- La automatización de la toma de datos provenientes de los amplificadores no ha podido ser la misma en el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 y en el amplificador Trek modelo 10/10B-HS debido a que las salidas BNC de ambos es distinta.

El control de los equipos y la toma de datos se ha automatizado en la medida de lo posible para cada sistema (APPC-NTP y APPCJ-NTP) y para cada amplificador de tensión (Trek modelo 10/10B-HS y GBS elektronik modelo Minipuls 4).

Esta automatización se ha realizado con el siguiente equipamiento y software:

- Controlador programable de la marca National Instrument concretamente el modelo CompactRio<sup>tm</sup> cRIO9063 dotado de un Controlador Dual-Core de 667 MHz y FPGA Artix-7.
- Módulo de la marca National Instruments modelo NI 9203: Módulo Entrada de Corriente Analógica,  $\pm 20$  mA, 200 kS/s, 8 Canales.
- Módulo de la marca National Instruments modelo NI 9211: Módulo de Entrada de Termopares de  $\pm 80$  mV, 14 kS/s, 4 Canales.
- Módulo de la marca National Instruments modelo NI9381: Módulo de E/S Multifunción de 0 V a 5 V.
- Bloque de la marca National Instruments modelo NI 9923: Bloque de Terminal de Tornillo de Montaje Frontal para Módulos D-SUB de 37 Pines.
- Software LabVIEW para programar en Real-Time el controlador y el FPGA.

Es importante señalar que el espectrómetro Ocean Optics Maya 2000Pro, pese a que existe la posibilidad de controlarlo a través del anterior controlador y software, ralentizaba enormemente el sistema de control y adquisición de datos por lo que se ha utilizado de forma independiente automatizando el control de éste y la adquisición con un software propio del Ocean Optics el software OceanView.

Por otro lado el sistema de gases se ha controlado con un controlador propio marca BRONKHORST modelo HI-TEC E-8103-2A-1A-00. Debiéndose seleccionar los caudales manualmente sobre el controlador y la toma de datos se realiza de forma manual.

#### **5.1.1. Metodología empleada en la toma de datos del sistema APPC-NTP.**

La metodología empleada para el control de la producción de plasma y la toma de datos en el sistema APPC-NTP se ha realizado de forma diferente cuando se ha utilizado el amplificador Trek modelo 10/10B-HS que cuando se ha utilizado el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4, debido a varios factores, entre ellos a que las salidas BNC de los amplificadores dan diferentes parámetros y a que la tensión en el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 es tan alta que la sonda de alto voltaje (HV: High Voltage) no llega a poder medirla.

a. *Control de la producción de plasma y toma de datos del sistema APPC-NTP utilizando el amplificador Trek modelo 10/10B-HS.*

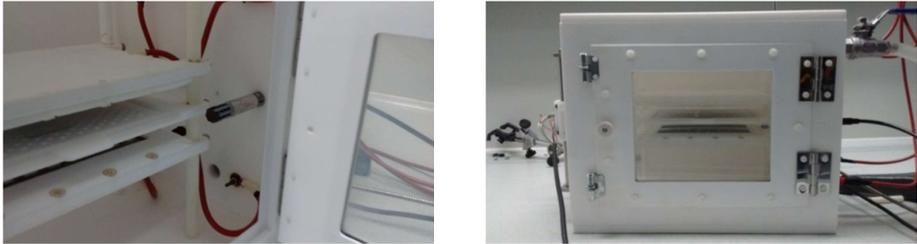
En este caso se ha realizado un programa en LabVIEW que ha permitido a través del controlador controlar el funcionamiento y realizar la toma de datos de los siguientes equipos:

- El generador de funciones Rigol modelo DG 5077.
- Amplificador Trek modelo 10/10B-HS.
- El osciloscopio Tektronic TDS 2024C.
- El termómetro de infrarrojos Calex modelo Pyromini-C-151.
- El sensor de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110.
- Sonda de temperatura PT100.

De esta forma y con el programa desarrollado en LabVIEW se ha automatizado la toma de datos de los siguientes parámetros: frecuencia de la señal, intensidad de corriente a la salida del amplificador, voltaje a la salida del amplificador, voltaje proveniente de la sonda de HV, humedad en el interior de la cámara, la temperatura de la superficie de la muestra y la temperatura en el interior de la cámara (esta última variable no se usará en el estudio de las correlaciones ya que con el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 no se ha podido realizar la medida de este parámetro).

Como ya se ha visto, el espectrómetro Ocean Optics Maya 2000Pro es controlado y sus espectros almacenados con su propio software el OceanView.





**Figura 5.1** Monitorización del sistema APPC-NTP.

*b. Control de la producción de plasma y toma de datos del sistema APPC-NTP utilizando el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.*

En este caso se ha realizado un programa en LabVIEW que ha permitido a través del controlador controlar el funcionamiento y realizar la toma de datos de los siguientes equipos:

- El generador de funciones Rigol modelo DG 5077.
- Amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.
- El termómetro de infrarrojos Calex modelo Pyromini-C-151.
- El sensor de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110.
- Sonda de temperatura PT100.

De esta forma y con el programa desarrollado en LabVIEW se ha automatizado la toma de datos de los siguientes parámetros: frecuencia de la señal, voltaje a la salida del amplificador, humedad en el interior de la cámara, la temperatura de la superficie de la muestra y la temperatura en el interior de la cámara.

El osciloscopio no se ha controlado en este caso de forma automática por falta de tiempo, luego los datos de este se toman manualmente.

Como ya se ha visto, el espectrómetro Ocean Optics Maya 2000Pro es controlado y sus espectros almacenados con su propio software el OceanView.

### **5.1.2. Metodología empleada en la toma de datos del sistema APPJ-NTP.**

En este caso, se ha realizado un programa en LabVIEW que ha permitido, a través del controlador, controlar el funcionamiento y realizar la toma de datos de los siguientes equipos:

- El generador de funciones Rigol modelo DG 5077.

- Amplificador Trek modelo 10/10B-HS.
- El osciloscopio Tektronic TDS 2024C.
- El termómetro de infrarrojos Calex modelo Pyromini-C-151.
- El sensor de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110.
- Sonda de temperatura PT100.

De esta forma y con el programa desarrollado en LabVIEW se ha automatizado la toma de datos de los siguientes parámetros: frecuencia de la señal, intensidad de corriente a la salida del amplificador, voltaje a la salida del amplificador, voltaje proveniente de la sonda de HV, humedad del aire cero o mezcla de gases inyectado en el jet, temperatura de la superficie de la muestra y temperatura en los alrededores de la salida del jet.

Como ya se ha visto, el espectrómetro Ocean Optics Maya 2000Pro es controlado y sus espectros almacenados con su propio software el OceanView.

En cuanto al control de la humedad se realiza de forma manual con el burbujeador colocado en el sistema de gases.

En cuanto al control de caudal, se realiza con el controlador propio de la marca BRONKHORST modelo HI-TEC E-8103-2A-1A-00. Debiéndose seleccionar los caudales manualmente sobre el controlador, la toma de datos se realiza de forma manual.

En caso de querer cambiar la proporción de  $O_2$  y  $N_2$  en el aire puro se dispone de la posibilidad de añadir  $O_2$ , conectando una botella de  $O_2$  al sistema y con un controlador de caudal másico de la marca BRONKHORST modelo HI-TEC E-8103-2A-1A-00 es posible introducir en el sistema un caudal constante de  $O_2$  por lo que podemos modificar la concentración de  $O_2$  en el aire cero. Aunque el sistema proporciona esta posibilidad, en esta tesis no se ha utilizado.



**Figura 5.2 Monitorización del sistema APPJ-NTP.**

## **5.2. Metodología empleada en el análisis estadístico de datos.**

Con el fin de investigar las relaciones existentes entre los resultados obtenidos y las condiciones operativas del proceso se han formulado y estimado un conjunto de Modelos de Regresión Múltiple (Romero et al., 2008). En cada uno de ellos la variable dependiente ha sido la característica resultante que se desea investigar.

Las posibles variables explicativas candidatas a entrar en el modelo han sido en todos los casos las correspondientes a las condiciones operativas que definen el proceso. En algunos casos, en los que los gráficos exploratorios previos pusieron de manifiesto la posibilidad de efectos no lineales en algunas de dichas variables, al realizar el ajuste del modelo se incluyeron entre las variables candidatas a entrar en el mismo términos cuadráticos para algunas de dichas variables.

Con el fin de incluir en el modelo sólo aquellas variables cuyo efecto resulte estadísticamente significativo se ha utilizado la técnica de “stepwise regresión” en su versión “backward”. Con esta técnica se opera de la siguiente forma:

- Paso 1: se ajusta un modelo de regresión incluyendo todas las variables candidatas. Si todas ellas resultan significativas (para un determinado nivel de significación dado, prefijado mediante un

determinado p-value) se finaliza el proceso reteniéndose ese modelo. Si no es así, se pasa al siguiente paso.

- Paso 2: se elimina del modelo la variable que ha resultado menos significativa y se realiza un nuevo ajuste incluyendo sólo las restantes variables.
- Paso 3 y sucesivos: Tras realizar un ajuste se constata, en primer lugar, que ninguna de las variables previamente excluidas pasa ahora a ser significativa. Si no fuera así, se incluye en el modelo la que lo fuera. Seguidamente se comprueba si todas las variables incluidas en el modelo son significativas, eliminándose la que menos lo sea en caso de que no fuera así.

Al final de este proceso se obtiene un modelo que cumple las dos condiciones siguientes:

- Todas las variables incluidas en el modelo resultan significativas para el nivel de significación considerado.
- Ninguna de las variables excluidas del modelo resultaría significativa si se incluyera en éste

En general en este estudio se han considerado significativos los efectos cuyo `p-value` asociado era inferior a 0.05, aunque en algunas ocasiones, y con carácter exploratorio, se ha subido este valor hasta 0.10.

Una vez obtenido el modelo correspondiente a una determinada característica, se ha comprobado que se satisfacían las hipótesis básicas de los modelos de regresión, construyendo un gráfico en papel probabilístico de los residuos. La obtención de una configuración aproximadamente lineal en este gráfico indica la aceptabilidad de las hipótesis de inexistencia de datos anómalos y de normalidad de los residuos.

Para el estudio de las características asociadas al espectro, las 24 ó 22 variables disponibles (según el sistema de que se trate) se han sintetizado previamente en un conjunto reducido de factores básicos subyacente que son los que se han utilizado como variables dependientes en los modelos de regresión. La técnica utilizada para reducir las 24 ó 22 variables iniciales a un número reducido de factores comunes esenciales ha sido el Análisis Factorial de Correlaciones (Peña, 2002), tal como se expone en el punto 5.2.1 de la presente tesis.

### **5.2.1. Metodología empleada con los espectros: Análisis Factorial de Correlaciones**

El problema que plantea el estudiar el efecto de las condiciones operativas sobre el espectro resultante es que este último viene definido por 24 variables ó 22 según el sistema, las alturas y áreas de los picos en 12 ó 11 longitudes de onda según el sistema.

No es una buena estrategia el realizar 24 ó 22 ajustes de regresión, pues un número tan elevado incrementa la probabilidad de obtener relaciones aparentemente significativas simplemente por azar. Adicionalmente muchos de los modelos serían redundantes por las correlaciones, algunas de ellas muy altas, existentes entre las 24 ó 22 variables del espectro.

La metodología utilizada ha consistido en sintetizar la información recogida en las 24 ó 22 variables del espectro en un conjunto reducido de factores básicos subyacentes, que son los que se han utilizado como variables dependientes en los modelos de regresión. La técnica utilizada para reducir las 24 variables iniciales a un número reducido de factores comunes esenciales ha sido el Análisis Factorial de Correlaciones.

El Análisis Factorial de Correlaciones (Peña, 2002) se utiliza para analizar la información contenida en un número elevado de variables de naturaleza cuantitativa relacionadas entre sí, sintetizándola en un número reducido de factores independientes. Cada uno de dichos factores se interpreta a partir de las correlaciones con las variables primitivas.

En principio el análisis obtiene tantos factores como variables existen. La importancia de cada factor se cuantifica por el porcentaje que explica de la variabilidad total de las variables analizadas, reteniéndose finalmente sólo aquéllos claramente interpretables para los que dicho porcentaje es elevado.

Para los análisis se han utilizado el software estadístico Statgraphics Centurion XVI.

## 5.2.2. Definición de variables de los sistemas de producción de plasma no térmico a presión atmosférica (APPC-NTP y APPJ-NTP)

### a. Variables Sistema APPC-NTP

#### I. Con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

##### Variables de entrada o independientes:

- Grosor del dieléctrico: Es el grosor de PTFE interpuesto entre el electrodo de tierra y el de potencia de cada uno de los electrodos SMD. La unidad utilizada en esta tesis es el milímetro (mm).
- Voltaje pico-pico ( $V_{pp}$ ): Esta variable la podríamos seleccionar de tres formas distintas, por una parte en la selección de  $V_{pp}$  cuando se genera la señal en el generador de funciones (generador de funciones Rigol modelo DG 5077), (esta se selecciona en V y se tendrá en cuenta que luego el amplificador la multiplica por 1000), otra opción es medir la señal  $V_{pp}$  a la salida del amplificador Trek modelo 10/10B-HS a través de un conector BNC dispuesto para ello en el equipo, conectando esto a un osciloscopio, y por último con la sonda de alta tensión Tektronix modelo P6015A. Puesto que experimentalmente han existido diferencias entre uno y otro método de determinación del  $V_{pp}$ , en esta tesis se ha optado por determinarla a través de la salida BNC que dispone el amplificador conectando ésta al osciloscopio Tektronic TDS 2024C, debido a que la sonda de alta tensión ha sufrido variación en su situación experimental a lo largo del desarrollo de la tesis. La unidad utilizada en esta tesis es el kilovoltio (kV).
- Frecuencia: Esta variable la seleccionamos en el generador de funciones. La unidad utilizada en esta tesis es el kilohercio (kHz).
- Humedad relativa del aire cero al inicio de la irradiación: Antes de comenzar la producción del plasma se inyecta aire cero en el interior de la cámara con una humedad determinada. En este caso vamos a

medir la humedad relativa del aire cero antes de comenzar la irradiación con la sonda Vaisala modelo HUMICAP® HMP110 la humedad relativa del aire puro introducido en la cámara antes de la irradiación. La medida es en %.

#### VARIABLES DE SALIDA O DEPENDIENTES:

Todas las variables de salida o variables dependientes se han tomado después de un tiempo de producción de plasma de 120 s.

- Intensidad de corriente: Esta variable es determinada conectando la salida tipo BNC que dispone a tal efecto el amplificador Trek modelo 10/10B-HS al osciloscopio Tektronic TDS 2024C. Es importante hacer notar que esta no puede ser seleccionada por el usuario, el usuario solo puede fijar la intensidad máxima de salida en nuestro caso la fijamos a 40 mA que es la máxima que permite el equipo. La unidad utilizada en esta tesis es el miliamperio (mA).
- Humedad final en el interior de la cámara: La humedad en el interior de la cámara del equipo APPC se toma a los 120 s de forma automática con la sonda en el tiempo seleccionado: En nuestro caso es la humedad de humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110 y el programa LabView.
- Temperatura de la muestra irradiada: La temperatura de la muestra toma a los 120 s con la sonda de infrarrojos Calex modelo Pyromini-C-151 de forma automática utilizando el programa LabView. Unidades °C.
- Temperatura interior de la cámara: La temperatura en el interior de la cámara del APPC se mide a los 120 s de forma automática con la sonda de temperatura PT100 y el programa LabView. Unidades °C.
- Espectro obtenido: En lugar de las especies reactivas se estudiarán los picos del espectro de emisión óptico obtenidos con el espectrómetro Ocean Optics Maya 2000Pro tal y como se ha descrito en el punto 4.2.1. En el caso del equipo APPC-NTP con el amplificador Trek

modelo 10/10B-HS el programa identifica en todos los espectros 12 picos de los cuales se estudiará tanto su altura de pico en cuentas como el área bajo pico también en cuentas. Después de 120 s de producción de plasma

## II. Con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4

### VARIABLES DE ENTRADA O INDEPENDIENTES:

- Grosor del dieléctrico: Es el grosor de PTFE interpuesto entre el electrodo de tierra y el de potencia de cada uno de los electrodos SMD. La unidad utilizada en esta tesis es el milímetro (mm).
- Voltaje pico-pico ( $V_{pp}$ ): En el caso de este amplificador se debe seleccionar en el generador de funciones una amplitud de 5V y una forma de onda cuadrada, también se debe de puentear las etapas de potencia; en esta tesis se han seleccionado dos etapas de potencia 22 y 28 kV<sub>pp</sub>. Esta variable la medimos con el BNC dispuesto a tal fin en el equipo conectándolo al osciloscopio al osciloscopio Tektronic TDS 2024C. Es importante destacar que cuando se selecciona la etapa de potencia no se selecciona el  $V_{pp}$  sino el máximo  $V_{pp}$  que se puede obtener con esa etapa de potencia. En este amplificador no es posible la selección de un  $V_{pp}$  determinado. Unidad de medida kV.
- Frecuencia: Esta variable la seleccionamos en el generador de funciones. La unidad utilizada en esta tesis es el kilohercio (kHz).
- Humedad del aire cero: Antes de comenzar la producción del plasma se inyecta aire cero en el interior de la cámara con una humedad determinada: En este caso vamos a medir la humedad relativa del aire cero antes de comenzar la irradiación con la sonda Vaisala modelo HUMICAP® HMP110 la humedad relativa del aire puro introducido en la cámara antes de la irradiación. La medida es en %.

VARIABLES DE SALIDA O DEPENDIENTES:

Todas las variables de salida o variables dependientes se han tomado después de un tiempo de producción de plasma de 120 s.

- Humedad interior de la cámara: La humedad en el interior de la cámara del equipo APPC se toma a los 120 s de forma automática con la sonda en el tiempo seleccionado: En nuestro caso es la humedad Vaisala modelo HUMICAP® HMP110 y el programa LabView. La medida es en %.
- Temperatura de la muestra irradiada: La temperatura de la muestra toma a los 120 s con la sonda de infrarrojos Calex modelo Pyromini-C-151 de forma automática utilizando el programa LabView. Unidades °C.
- Temperatura interior de la cámara: La temperatura en el interior de la cámara del APPC se mide a los 120 s de forma automática con la sonda de temperatura PT100 y el programa LabView. Unidades °C.
- Espectro obtenido: En lugar de las especies reactivas se estudiarán los picos del espectro de emisión óptico obtenidos con el espectrómetro Ocean Optics Maya 2000Pro tal y como se ha descrito en el punto 4.2.1. En el caso del equipo APPC-NTP con el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4 el programa identifica en todos los espectros 11 picos de los cuales se estudiará tanto su altura de pico en cuentas como el área bajo pico también en cuentas. Todas las variables de salida o variables dependientes se han tomado después de un tiempo de producción de plasma de 120 s.

*b. Variables Sistema APPJ-NTP*

VARIABLES DE ENTRADA O INDEPENDIENTES:

- Diámetro o grosor del electrodo de potencia: Es el diámetro de acero del electrodo de potencia. La unidad utilizada en esta tesis es el milímetro (mm).
- Voltaje pico-pico ( $V_{pp}$ ): Esta variable la podríamos seleccionarla de tres formas distintas, por una parte, en la selección de  $V_{pp}$  cuando se genera la señal en el

generador de funciones (generador de funciones Rigol modelo DG 5077), (esta se selecciona en V y se tendrá en cuenta que luego el amplificador la multiplica por 1000), otra opción es medir la señal  $V_{pp}$  a la salida del amplificador Trek modelo 10/10B-HS a través de un conector BNC dispuesto para ello en el equipo, conectando esto a un osciloscopio y por último con la sonda de alta tensión Tektronix modelo P6015A. Puesto que experimentalmente han existido diferencias entre uno y otro método de determinación del  $V_{pp}$ , en esta tesis se ha optado por determinarla a través de la salida BNC que dispone el amplificador, conectando ésta al osciloscopio Tektronic TDS 2024C debido a que la sonda de alta tensión ha sufrido variación en su situación experimental a lo largo del desarrollo de la tesis. La unidad utilizada en esta tesis es el kilovoltio (kV).

- Frecuencia: Esta variable la seleccionamos en el generador de funciones. La unidad utilizada en esta tesis es el kilohercio (kHz).
- Humedad relativa del aire cero: Durante la producción del plasma, el aire cero se inyecta en el APPJ-NTP con una humedad determinada. El valor de ésta, tal y como está diseñado el sistema, sólo puede ser determinada o medida antes de comenzar la irradiación a través de una llave manual en el sistema de generación de gases, entre el humidificador y el equipo APPJ-NTP. Dicha llave permite la salida al medio ambiente de parte del aire que se conduce al equipo APPJ-NTP. Esta humedad se medirá con la sonda Vaisala modelo HUMICAP® HMP110. La medida es en %.
- Caudal de aire cero: Durante la producción del plasma se inyecta un caudal de aire cero contante, dicho caudal se controla con el caudalímetro másico Bronkhorst HI TEC F-201 AV y con el controlador electrónico BronskHorst HI TEC E-8103-2<sup>a</sup>. En l/min.

### VARIABLES DE SALIDA O DEPENDIENTES:

Todas las variables de salida o variables dependientes se han tomado después de un tiempo de producción de plasma de 120 s.

- Intensidad de corriente: Esta variable es determinada conectando la salida tipo BNC que dispone a tal efecto el amplificador Trek modelo 10/10B-HS al osciloscopio Tektronic TDS 2024C. Es importante hacer notar que esta no puede ser seleccionada por el usuario, el usuario sólo puede fijar la intensidad máxima de salida en nuestro caso la fijamos a 40 mA que es la máxima que permite el equipo. La unidad utilizada en esta tesis es el miliamperio (mA).
- Temperatura de la muestra irradiada. Para medir la temperatura de la muestra se orienta el sensor de infrarrojos al área del cristal de cuarzo interpuesto entre el APPJ-NTP y el espectrómetro donde incide el plasma y que equivaldría al punto donde se encontraría la muestra. La medida se realiza con la sonda de infrarrojos Calnex modelo Pyromini-C-151 de forma automática utilizando el programa LabView. Unidades °C.
- Espectro obtenido (en esta tesis se estudiarán las diferentes longitudes de onda del espectro de emisión del plasma): En lugar de las especies reactivas se estudiarán los picos del espectro de emisión óptico obtenidos con el espectrómetro Ocean Optics Maya 2000Pro tal y como se ha descrito en el punto 4.2.1. En el caso del equipo APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS el programa identifica en todos los espectros 11 picos de los cuales se estudiará tanto su altura de pico en cuentas como el área bajo pico también en cuentas. Después de 120 s de producción de plasma.

### **5.3. Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma.**

Ver apéndice I.

#### 5.4. Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma.

##### 5.4.1. Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

Con el fin de simplificar los cálculos estadísticos y las tablas se van a identificar las longitudes de onda de los picos con un identificador numérico. Con el sistema APPC-NTP y el amplificador Trek modelo 10/10B-HS en la inmensa mayoría de los espectros se identifican 12 picos es decir 12 longitudes de onda

Longitud de onda ( $\lambda$ ) en nm	Identificador pico
254.328	1
313.801	2
335.981	3
356.402	4
378.266	5
402.493	6
426.131	7
650.483	8
771.530	9
854.400	10
888.345	11
965.915	12

**Tabla 5.1 Longitudes de onda de los picos del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

En la tabla “Apéndice II. Tabla I” se presentan los valores de las variables de salida para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS.

##### 5.4.2. Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4

Con el fin de simplificar los cálculos estadísticos y las tablas se van a identificar las longitudes de onda de los picos con un identificador numérico. Con el sistema APPC-NTP y el amplificador GBS elektronik

modelo Minipuls 4, en la inmensa mayoría de los espectros se identifican 11 picos es decir 11 longitudes de onda.

Longitud de onda ( $\lambda$ ) en nm	Identificador pico
290.41	1
314.44	2
335.89	3
356.62	4
379.53	5
403.02	6
425.97	7
661.36	8
772.47	9
866.34	10
888.78	11

**Tabla 5.2 Longitudes de onda de los picos del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4**

En la tabla “Apéndice II. Tabla II” se presentan los valores de las variables de salida para el sistema APPC-NTP con el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

#### **5.4.3. Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Con el fin de simplificar los cálculos estadísticos y las tablas se van a identificar las longitudes de onda de los picos con un identificador numérico. Con el sistema APPJ-NTP y el amplificador Trek modelo 10/10B-HS, en la inmensa mayoría de los espectros se identifican 11 picos es decir 11 longitudes de onda.

Longitud de onda ( $\lambda$ ) en nm	Identificador pico
296.291	1
314.554	2
335.842	3

---

356.680	4
379.263	5
404.510	6
425.817	7
663.518	8
772.456	9
868.666	10
888.024	11

**Tabla 5.3 Longitudes de onda de los picos del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

En la tabla “Apéndice II. Tabla III” se presentan los valores de las siguientes variables de salida para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS.



# Capítulo 6: Resultados

Los resultados los vamos a estudiar por separado para cada uno de los sistemas aunque trataremos de ver si existe algún tipo de similitud entre un sistema y otro de forma que se pueda generalizar de alguna manera.

El estudio estadístico que lleva a los resultados de la presente tesis se encuentra desarrollado en el apéndice III “Estudio estadísticos de los sistemas” de la presente tesis.

Es importante destacar que para cada uno de los 316 experimentos se ha dedicado un tiempo medio de 2 horas antes de poder realizar el estudio estadístico. Este tiempo se ha repartido entre el montaje experimental, adquisición de datos, manipulación de datos y el análisis de espectros.

## **6.1. Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

### **6.1.1. La Intensidad de corriente**

Como ya se ha mencionado en esta tesis, aunque la intensidad de corriente con otro amplificador de tensión distinto pueda ser establecida por el operador como variable de entrada del sistema, en nuestro amplificador no es posible establecerla de este modo aunque no es un parámetro característico del plasma ni un parámetro que afecte a las muestras a descontaminar si es un parámetro que varía en función de otros parámetros que fija el operador del sistema. En nuestro sistema sólo puede establecerse el valor máximo de intensidad, no es posible establecer valor fijo.

La variación que presenta la intensidad de corriente que circula por la cámara se muestra en el apéndice III “Estudio estadístico de los sistemas” de la presente tesis, tal y como se puede ver en dicho apéndice, depende de las variables de entrada de la siguiente manera:

- a. Cuando el voltaje aumenta, aumenta la intensidad de corriente.
- b. Cuando la frecuencia aumenta, aumenta la intensidad de corriente.
- c. Cuando el grosor del dieléctrico aumenta disminuye la intensidad de corriente.
- d. La humedad inicial que existe en el interior de la cámara no tiene ningún efecto significativo sobre el aumento o disminución de la intensidad de corriente.

El aumento de la intensidad de corriente, con el voltaje y la frecuencia para un espesor de dieléctrico dado hace que al final se produzca la ruptura del dieléctrico porque se supera el valor de rigidez dieléctrica del teflón. Por lo que sería interesante disponer de un sistema que permita controlar la intensidad de corriente máxima para cada valor de Voltaje, Frecuencia y Espesor de dieléctrico a fin de evitar la ruptura de éste.

### **6.1.2. La humedad final**

El comportamiento de la humedad final (a los 120 segundos de irradiación) en el interior de la cámara es el siguiente:

- a. La humedad final es mayor cuanto mayor es la humedad inicial que hay en la cámara.
- b. La humedad final es mayor cuanto más alto es el voltaje aplicado.
- c. Las demás variables como son el grosor del dieléctrico y la frecuencia no tienen efecto significativo sobre el valor de la humedad final (a los 120 s de irradiación).

El punto a) es un comportamiento esperable, cuando mayor es la humedad inicial mayor es la humedad a los 120 s de irradiación, sólo sería esperable otro comportamiento si la humedad dentro de la cámara hubiese desaparecido por descomposición del H<sub>2</sub>O en especies reactivas del plasma. El punto c) también era esperable y en cuanto al punto b) no

se encuentra explicación alguna para este comportamiento. Es posible que el alto voltaje y su aumento interfiera en la propia sonda de humedad dando lugar a un aumento de la señal del sensor que se traduzca en un aparente aumento de la humedad.

En todo caso, más que el valor de la humedad a los 120 s, que es un tiempo determinado, sería mucho más interesante el estudio del comportamiento temporal de este parámetro, ya que puede ser un parámetro importante para la descontaminación biológica debido a que la existencia de agua en el interior puede favorecer la aparición de peróxidos y así favorecer la descontaminación biológica, aunque por otro lado, se comportará necesariamente como oxidante, luego este parámetro debería ser estudiado con detalle si lo que se pretende es descontaminar material sensible.

### **6.1.3. Temperatura de la muestra**

La temperatura de la muestra es otra variable que no es demasiado importante si solo se tratara de producir plasma. Pero de hecho, el sistema APPC-NTP tiene como objetivo producir plasma a temperatura ambiente con el fin poder descontaminar material sensible y material biológico, por otro lado, también es interesante mantener la temperatura en la muestra lo más baja posible con el fin de garantizar que la descontaminación biológica en caso de producirse se deba exclusivamente al efecto del plasma y no a efectos térmicos.

Con todo, el comportamiento de la temperatura con respecto a las variables de entrada se comporta de la siguiente manera:

- a. La temperatura de la muestra aumenta conforme aumenta el grosor del dieléctrico.
- b. También parece aumentar la temperatura de la muestra conforme aumenta el voltaje, aunque tal y como se muestra en el apartado de resultados, este efecto es dudoso debido a que el “p-value” es de sólo 0.087.
- c. El resto de variables como la frecuencia y la humedad inicial no son significativos estadísticamente.

En este caso, también sería interesante conocer la evolución temporal de la temperatura con el tiempo y no sólo la temperatura a 120 s, ya que si son necesarios tiempos largos de irradiación, puede ser un factor clave.

En todo caso, el valor más elevado de temperatura a los 120 s ha sido de 32.12 °C y el valor mínimo de 25.41 °C por lo que no supone problema alguno para material sensible, al menos irradiando 120 s.

#### 6.1.4. Temperatura de la cámara

A esta variable le pasa lo mismo que a la temperatura de la muestra, no sería de gran importancia si solo se tratase de producir plasma, pero como en el caso anterior, como estamos interesados en descontaminar equipos sensibles es una variable que conviene controlar.

El comportamiento de esta variable dependiente con respecto a las variables independientes es el siguiente:

- a. Aparentemente cuando mayor es el grosor del dieléctrico mayor es la temperatura de la cámara aunque su significación estadística es dudosa.
- b. La temperatura de la cámara aumenta conforme aumenta el voltaje, aunque este aumento es menos marcado a medida que se incrementan los valores del voltaje
- c. La temperatura de la cámara disminuye conforme aumenta la humedad inicial; esta disminución es menos importante conforme aumenta la humedad inicial.

El valor máximo de temperatura de la cámara ha sido 31.84 °C y el mínimo 25.09 °C valores que permiten trabajar perfectamente con material sensible y muy similares a los de la temperatura de la muestra. lo que da idea que la temperatura en todo el interior de la cámara es muy homogénea. Con lo cual, con el valor de esta variable se puede controlar la temperatura de todos los experimentos. Por lo que en caso de querer monitorizar temperaturas se recomienda usar esta variable mucho más fácil de monitorizar.

#### 6.1.5. Espectro

Tal y como aparece en el punto 5.4.1 de la presente tesis las longitudes de onda estudiadas son las doce siguientes:

Longitud de onda ( $\lambda$ ) en nm
254.328
313.801
335.981
356.402

378.266
402.493
426.131
650.483
771.530
854.400
888.345
965.915

**Tabla 6.1 Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.**

El programa de análisis e identificación de espectros Plasus SpecLine Versión 2.13 identifica los siguientes picos:

- Inferior: Inf.
- Superior: Sup.

Elemento	Línea [nm]	I (rel.)	Energía [eV]		Transición		Número cuántico		Comentario
			Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	
C IV	253.3727	74	50.89	55.78	4f <sup>2</sup> F°	5d <sup>2</sup> D	3½	2½	
C IV	253.3727	4	50.89	55.78	4f <sup>2</sup> F°	5d <sup>2</sup> D	2½	2½	
C IV	253.3836	51	50.89	55.78	4f <sup>2</sup> F°	5d <sup>2</sup> D	2½	1½	
O III	253.4064	23	40.59	45.48	3d <sup>3</sup> D°	4p <sup>3</sup> D	3	3	
CN	253.45	400			A <sup>2</sup> Pi	F <sup>2</sup> Del	8	2	Douglas/Routly's Systeme
N II	314.9866	118	23.47	27.41	3d <sup>1</sup> F°	5f <sup>2</sup> [3½]	3	4	
N II	315.0276	24	23.47	27.41	3d <sup>1</sup> F°	5f <sup>2</sup> [3½]	3	3	
C III	315.5073	12	38.22	42.15	3s' <sup>3</sup> P°	5s <sup>3</sup> S	1	1	
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	315	0							Absorptionsb ande: Maximum
CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	314.95	400			X <sup>2</sup> Pi	A <sup>2</sup> Pi			Fox, Duffendack and Barker's System
CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	315.52	500			X <sup>2</sup> Pi	A <sup>2</sup> Pi			Fox, Duffendack y Barker's System
NCO	314.99	0			<sup>2</sup> Pi	<sup>2</sup> Pi			Absorptionsb ande
N III	336.736	1231	35.67	39.35	3p' 4P°	3p' 4P	2½	2½	
O III	336.3812	1	36.89	40.58	3p <sup>3</sup> S	3d <sup>3</sup> D°	1	2	
O IV	336.255	443	58.83	62.51	3p' 4S	3d' 4P°	1½	1½	
O IV	336.321	135	71.52	75.21	3s 4P	3p 4P°	½	1½	
O IV	336.865	28	71.52	75.20	3s 4P	3p 4P°	½	½	
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	336.3	200							Absorptionsb ande
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CHO	336.39	400							Absorptionsb ande
NO	336.43	0	0.00	5.69	X <sup>2</sup> Pi	B <sup>2</sup> Pi			
N I	357.2	1	10.33	13.80	3s 4P	5p 4P	½	½	

NO	357.24	1000	0.00	5.69	X <sup>2</sup> Pi	B <sup>2</sup> Pi	10	0	
H <sub>2</sub>	373.2666	0	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	s <sup>3</sup> Del(g)	1	3	Q3-Linie
H <sub>2</sub>	373.347	23	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	0	2	R4-Linie
O <sub>2</sub>	373.4	800	0.00	4.48	X <sup>3</sup> Sig-g	A <sup>3</sup> Sig+u	6	1	Night-Sky Bande, Emission
O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	373.39	800	0.00	4.81	X <sup>2</sup> Pi(g)	A <sup>2</sup> Pi(u)	8	1	Neg. System, R2-Head
N III	375.263	15	38.39	41.70	3p 4D	3d 4P <sup>o</sup>	½	½	
O II	375.2089	0	25.64	28.94	3p 4D <sup>o</sup>	3d <sup>2</sup> P	1½	1½	
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub>	375.2	0							
H <sub>2</sub>	375.1887	340	11.37		B <sup>1</sup> Sig+u	l <sup>1</sup> (2*)	0	2	P4-Linie
H <sub>2</sub>	375.2622	180	11.37	14.06	B <sup>1</sup> Sig+u	J <sup>1</sup> Del(g)	0	2	R2-Linie
NH	375.18	0	0.00	3.69	X <sup>3</sup> Sig	A <sup>3</sup> Pi	1	0	Q2-Linie
H	379.79	2	10.20	13.46	2p <sup>2</sup> P <sup>o</sup>	10d <sup>2</sup> D	½	1½	
H <sub>2</sub>	379.6904	68	11.37	14.86	B <sup>1</sup> Sig+u	S <sup>1</sup> Del(g)	1	0	Q3-Linie
H <sub>2</sub>	379.7521	230	11.37	13.98	B <sup>1</sup> Sig+u	G <sup>1</sup> Sig+g	1	3	R0-Linie
H <sub>2</sub>	379.7917	180	11.37	14.02	B <sup>1</sup> Sig+u	I <sup>1</sup> Pi(g)	1	3	Q1-Linie
H <sub>2</sub>	379.884	140	11.37	14.86	B <sup>1</sup> Sig+u	S <sup>1</sup> Del(g)	1	0	P4-Linie
O II	380.2025	0	29.80	33.06	4s <sup>2</sup> P	4p <sup>2</sup> D <sup>o</sup>	½	1½	
O II	380.2984	74	26.56	29.82	3p <sup>2</sup> P <sup>o</sup>	4s <sup>2</sup> P	1½	1½	
O II	380.3111	480	26.56	29.82	3p <sup>2</sup> P <sup>o</sup>	4s <sup>2</sup> P	1½	1½	
O II	380.3137	0	22.97	26.23	3s 4P	3p <sup>2</sup> D <sup>o</sup>	½	1½	
O III	380.2211	6	45.44	48.70	4p <sup>3</sup> D	5s <sup>1</sup> P <sup>o</sup>	1	1	
CHO	380.27	0							Vaidya's Hydrocarbon Flame Bande, B
H <sub>2</sub>	380.1611	160	11.37	14.02	B <sup>1</sup> Sig+u	I <sup>1</sup> Pi(g)	0	2	R4-Linie
H <sub>2</sub>	380.2179	45	11.89	13.97	a <sup>3</sup> Sig+g	d <sup>3</sup> Pi(u)	2	8	Fulcherbande: Q1-Linie
H <sub>2</sub>	380.3033	340	11.37	13.98	B <sup>1</sup> Sig+u	G <sup>1</sup> Sig+g	1	3	R2-Linie
H <sub>2</sub>	380.3288	140	11.37	14.02	B <sup>1</sup> Sig+u	I <sup>1</sup> Pi(g)	1	3	P3-Linie
H <sub>2</sub>	380.3386	45	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	0	2	P5-Linie
N II	403.7961	31	23.14	26.21	3d <sup>3</sup> F <sup>o</sup>	4f <sup>2</sup> [2½]	4	3	
H <sub>2</sub>	403.6344	140	11.37	13.98	B <sup>1</sup> Sig+u	G <sup>1</sup> Sig+g	2	3	P4-Linie
H <sub>2</sub>	403.6344	140	11.89	13.97	a <sup>3</sup> Sig+g	d <sup>3</sup> Pi(u)	2	7	Fulcherbande: Q3-Linie
H <sub>2</sub>	403.6661	68	11.89	15.00	a <sup>3</sup> Sig+g	n <sup>3</sup> Pi(u)	0	0	Q4-Linie
H <sub>2</sub>	403.7291	45	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	s <sup>3</sup> Del(g)	1	2	R2-Linie
H <sub>2</sub>	403.7914	23	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	1	2	R1/R3-Linie
C I	404.6231	0	7.95	11.01	1s2p <sup>3</sup> <sup>3</sup> D	8p <sup>3</sup> D	3	2	
C I	404.6711	1	7.95	11.01	1s2p <sup>3</sup> <sup>3</sup> D	8p <sup>3</sup> D	1	2	
C I	404.6891	1	7.95	11.01	1s2p <sup>3</sup> <sup>3</sup> D	8p <sup>3</sup> D	2	2	
O II	404.6118	15	28.69	31.76	3d 4F	4f 4F <sup>o</sup>	3½	4½	
H <sub>2</sub>	404.5479	160	11.37	14.02	B <sup>1</sup> Sig+u	I <sup>1</sup> Pi(g)	1	2	R0-Linie
H <sub>2</sub>	404.5592	45	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	s <sup>3</sup> Del(g)	1	2	Q4-Linie
H <sub>2</sub>	404.6201	68	11.89	15.00	a <sup>3</sup> Sig+g	n <sup>3</sup> Pi(u)	0	0	P2-Linie
H <sub>2</sub>	404.6202	68	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	0	1	Q2-Linie
H <sub>2</sub>	404.6807	0	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	0	1	R6-Linie
O I	405.9278	0	12.54	15.59	3s' <sup>3</sup> D	4p' <sup>3</sup> D	2	3	
O I	405.936	0	12.54	15.60	3s' <sup>3</sup> D	4p' <sup>3</sup> D	1	2	
O I	405.9549	1	12.73	15.78	3s' <sup>1</sup> D	3p'' <sup>3</sup> D	2	2	
O I	406.0493	5	12.73	15.78	3s' <sup>1</sup> D	3p'' <sup>3</sup> D	2	3	
O II	406.06	155	31.15	34.20	3d' <sup>2</sup> F	4f' <sup>2</sup> G <sup>o</sup>	3½	3½	
O II	406.0526	5496	31.15	34.20	3d' <sup>2</sup> F	4f' <sup>2</sup> G <sup>o</sup>	3½	4½	
O II	406.1029	4169	31.15	34.20	3d' <sup>2</sup> F	4f' <sup>2</sup> G <sup>o</sup>	2½	3½	

H <sub>2</sub>	405.9816	68	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	p <sup>3</sup> Sig+g	0	1	R1-Linie
H <sub>2</sub>	405.996	68	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	p <sup>3</sup> Sig+g	0	1	Q1-Linie
H <sub>2</sub>	406.0572	0	11.89	14.68	a <sup>3</sup> Sig+g	k <sup>3</sup> Pi(u)	0	1	R2-Linie
H <sub>2</sub>	406.1006	0	11.37		B <sup>1</sup> Sig+u	<sup>1</sup> (2*)	2	2	P4-Linie
N <sub>2</sub>	405.94	800	7.39	11.05	B <sup>3</sup> Pi(g)	C <sup>3</sup> Pi(u)	3	0	2. Pos. System
C III	424.7311	43	39.64	42.56	3p <sup>1</sup> P	5p <sup>1</sup> P°	1	1	
N II	424.7223	98	23.25	26.16	3d <sup>3</sup> D°	4f <sup>2</sup> [2½]	3	3	
CO+	424.89	1000	0.00	2.57	X <sup>2</sup> Sig+	A <sup>2</sup> Pi	0	2	Comet-Tail System, R1-Linie
H <sub>2</sub>	424.7003	68	11.37	14.72	B <sup>1</sup> Sig+u	R <sup>1</sup> Pi(g)	3	0	P2-Linie
H <sub>2</sub>	424.7753	0	11.37	13.98	B <sup>1</sup> Sig+u	G <sup>1</sup> Sig+g	3	3	P4-Linie
C III	425.6373	1	39.92	42.84	4f <sup>3</sup> F°	5d <sup>3</sup> D	3	3	
C III	425.6451	6	39.92	42.84	4f <sup>3</sup> F°	5d <sup>3</sup> D	3	2	
C III	425.675	10	42.17	45.08	3d <sup>3</sup> P°	7s <sup>3</sup> S	1	1	
C III	425.7894	7	39.93	42.84	4f <sup>3</sup> F°	5d <sup>3</sup> D	4	3	
O II	425.7544	525	28.84	31.75	3d 4P	4f 4F°	½	1½	
H <sub>2</sub>	425.673	91	11.37		B <sup>1</sup> Sig+u	<sup>1</sup> (2*)	0	1	P3-Linie
H <sub>2</sub>	425.7232	0	11.87	14.03	c <sup>3</sup> Pi(u)	j <sup>3</sup> Del(g)	0	3	P3-Linie
H <sub>2</sub>	425.7491	0	11.37		c <sup>3</sup> Pi(u)	<sup>1</sup> (2*)	3	2	P3-Linie
H <sub>2</sub>	425.8099	0	11.87	14.69	B <sup>1</sup> Sig+u	p <sup>3</sup> Sig+g	1	2	P6-Linie
O II	650.9711	0	31.72	33.62	4fG <sup>2</sup> [4]°	6g <sup>2</sup> [5]	4½	5½	
O II	651.0615	0	31.72	33.62	4fG <sup>2</sup> [4]°	6g <sup>2</sup> [5]	3½	4½	
O II	651.0763	0	31.15	33.05	3d <sup>2</sup> F	4p <sup>2</sup> F°	2½	2½	
H <sub>2</sub>	650.9915	45	12.40		C <sup>1</sup> Pi(u)	<sup>1</sup> (2*)	1	2	P2-Linie
H <sub>2</sub>	651.0114	23	11.37	13.98	B <sup>1</sup> Sig+u	G <sup>1</sup> Sig+g	5	0	R2-Linie
C III	777.176	54	40.58	42.17	3p <sup>3</sup> S	3d <sup>3</sup> P°	1	0	
O I	777.1944	468	9.15	10.74	3s 5S°	3p 5P	2	3	
H <sub>2</sub>	777.0249	23	13.36	14.70	e <sup>3</sup> Sig+u	r <sup>3</sup> Pi(g)	2	3	P6-Linie
H <sub>2</sub>	777.1391	0	11.87	14.03	c <sup>3</sup> Pi(u)	j <sup>3</sup> Del(g)	3	1	P4-Linie
O II	960.3698	26	32.91	34.20	5d 4P	4f <sup>2</sup> G°	2½	3½	
H <sub>2</sub>	960.3809	91	11.87	14.01	c <sup>3</sup> Pi(u)	i <sup>3</sup> Pi(g)	3	0	Q3-Linie
C I	963.4759	86	9.70	10.98	3d <sup>3</sup> F	7f <sup>2</sup> [7]	2	3	
H <sub>2</sub>	963.3785	11.37			B <sup>1</sup> Sig+u	<sup>1</sup> (2*)	13	1	R0-Linie
H <sub>2</sub>	963.3785	12.40	13.98		C <sup>1</sup> Pi(u)	G <sup>1</sup> Sig+g	3	2	Q2-Linie

**Tabla 6.2 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.**

Aceptando como máximo una diferencia en la longitud de onda de 5 nm entre los picos identificados por un software y el otro tenemos que las especies reactivas que aparecen son:

C I , C III , C IV, CHO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>CHO, C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>,CO+, CO<sub>2</sub>+, H<sub>2</sub>, H, O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>+, O I, O II, O III, O IV, N<sub>2</sub>, N II, N III, CN, N I, N II, NH, NO ,NCO.

El hidrógeno en todas sus formas se debe a la humedad del aire y el C aparece como contaminante, ya que no se encuentra en el aire cero, en principio debería haber desaparecido durante la producción de éste.

Con el fin de poder relacionar más fácilmente las especies reactivas con los picos construimos la siguiente tabla:

Identificador	Longitud de onda ( $\lambda$ ) en nm	Especie reactiva
1	254.328	C IV O III CN
2	313.801	N II C III C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O CO <sub>2</sub> <sup>+</sup> NCO
3	335.981	N III O III O IV C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CHO NO
4	356.402	N I NO
5	378.266	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>+</sup> N III C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NH H O II O III CHO
6	402.493	N II H <sub>2</sub> C I O II N <sub>2</sub>
7	426.131	C III N <sub>2</sub> CO <sup>+</sup> H <sub>2</sub> O II
8	650.483	H <sub>2</sub> O II
9	771.530	C III

		O I H <sub>2</sub>
10	854.400	-
11	888.345	-
12	965.915	H <sub>2</sub> O II C I

**Tabla 6.3** Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda con especies reactiva del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.

Vemos que existen dos picos que no identifican nada, el 10 y el 11.

En todo caso, tal y como se puede ver en el punto 1.5.1 del apéndice III, de cada uno de los picos se ha tomado la altura de pico y el área por lo que para este caso nos daría 24 variables primitivas. Que hemos conseguido reducir a un único factor con el fin de simplificar el número de correlaciones.

El comportamiento del Factor A con respecto a la altura y el área de los picos es el siguiente:

- a. Cuando el Factor A tiene un valor positivo elevado, las alturas de los picos 2, 3, 4, 5 y 6 es elevada, en cambio la del pico 1 es baja, y la del 8 es también baja pero en menor medida.
- b. En cuanto a las áreas si el Factor A es elevado las áreas de los picos 3 y 4 son elevadas, y pequeñas las de los picos 1 y 2.

Tal y como se puede ver en el punto 1.5.2 del apéndice III el Factor A aumenta al aumentar el Voltaje y la frecuencia, mientras que disminuye cuando aumenta el grosor del dieléctrico y la humedad inicial. Esto quiere decir lo siguiente:

- a. La altura de los picos 2, 3, 4, 5 y 6 aumenta cuando aumenta el voltaje y la frecuencia, y la de los picos 1 y 8 disminuye conforme aumenta el voltaje y la frecuencia.
- b. La altura de los picos 2, 3, 4, 5 y 6 disminuye cuando aumenta el grosor del dieléctrico y la humedad inicial, y la de los picos 1 y 8 aumenta conforma aumenta el grosor del dieléctrico y la humedad inicial.
- c. En cuanto a las áreas, cuando el voltaje y la frecuencia aumentan, se incrementan las áreas de los picos 3 y 4 y disminuyen la de los picos 1 y 2, y cuando la humedad inicial y

el grosor del dieléctrico aumentan, el área de los picos 3 y 4 disminuye y la de los picos 1 y 2 aumenta.

El aumento del pico 8 con la humedad inicial, teniendo en cuenta que tanto el área del pico como su altura se deben exclusivamente al  $H_2$  y O II, parece lógico, ya que si aumenta la humedad se produce mayor  $H_2$  y O II por descomposición del agua.

## **6.2. Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

### **6.2.1. La humedad final**

El comportamiento de la humedad final (a los 120 segundos de irradiación) en el interior de la cámara es el siguiente:

- a. La humedad final es mayor cuanto mayor es la humedad inicial que hay en la cámara.
- b. En el caso de este amplificador no existe un resultado significativo con ninguna otra variable es decir no existe relación estadísticamente significativa ni con el grosor del dieléctrico, ni con el voltaje ni con la frecuencia.

El punto a) es un comportamiento esperable, cuanto mayor es la humedad inicial mayor es la humedad a los 120 s de irradiación, sólo sería esperable otro comportamiento si la humedad dentro de la cámara hubiese desaparecido por descomposición del  $H_2O$  en especies reactivas del plasma. El punto de b) también era previsible, luego esta variable dependiente no presenta ningún comportamiento distinto al esperable a priori.

En todo caso, más que el valor de la humedad a los 120 s que es un tiempo determinado, sería mucho más interesante el estudio del comportamiento temporal de este parámetro, ya que puede ser un parámetro importante para la descontaminación biológica debido a que la existencia de agua en el interior puede favorecer la aparición de peróxidos y así favorecer la descontaminación biológica, aunque, por otro lado, se comportará necesariamente como oxidante, luego este parámetro debería ser estudiado con detalle si lo que se pretende es descontaminar material sensible.

### 6.2.2. Temperatura de la muestra

Lógicamente tal y como ocurre en con el APPC-NTP pero con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS, la temperatura de la muestra es otra variable que no es demasiado importante si sólo se tratara de producir plasma. Pero de hecho, el sistema APPC-NTP tiene como objetivo producir plasma a temperatura ambiente con el fin poder descontaminar material sensible y material biológico, por otro lado, también es interesante mantener la temperatura en la muestra lo más baja posible con el fin de garantizar que la descontaminación biológica, en caso de producirse, se debe exclusivamente al efecto del plasma y no a efectos térmicos.

Con todo, el comportamiento de la temperatura de la muestra con respecto a las variables independientes de entrada es el siguiente:

- a. La temperatura de la muestra aumenta conforme aumenta el grosor del dieléctrico, tal y como ocurre con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS.
- b. También parece aumentar la temperatura de la muestra conforme aumenta el voltaje, tal y como ocurre con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS.
- c. En el caso de este amplificador, se ha detectado que la temperatura de la muestra disminuye al aumentar la frecuencia.
- d. Asimismo, la temperatura de la muestra también disminuye al aumentar la humedad inicial de la cámara.

También sería interesante conocer la evolución temporal de la temperatura con el tiempo y no solo la temperatura a 120 s, ya que si son necesarios tiempos largos de irradiación puede ser un factor clave.

El valor más elevado de temperatura a los 120 s ha sido de 31.91 °C y el valor mínimo de 27.02 °C por lo que no supone problema alguno para material sensible, al menos irradiando 120 s.

### 6.2.3. Temperatura de la cámara

A esta variable le pasa lo mismo que a la temperatura de la muestra, no sería de gran importancia si solo se tratase de producir plasma, pero como en el caso anterior, como estamos interesados en descontaminar equipos sensibles, es una variable que conviene controlar.

El comportamiento de esta variable dependiente con respecto a las variables independientes es el siguiente:

- a. La temperatura de la cámara aumenta conforme aumenta el voltaje, aunque este aumento es menos marcado a medida que se incrementan los valores del voltaje
- b. La temperatura de la cámara aumenta conforme aumenta la humedad.
- c. La temperatura de la cámara disminuye conforme mayor es el grosor del dieléctrico.
- d. En cuanto a la relación con la frecuencia se observa que la temperatura es mínima para una frecuencia de 6 kHz aumentando tanto para valores más bajos o más altos de ésta.

Pese al comportamiento aparentemente distinto con respecto al otro amplificador recordemos que con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS, cuando aumentaba el grosor del dieléctrico aumentaba la temperatura de la cámara, y que cuando aumentaba la humedad inicial disminuía la temperatura de la cámara. Se comporta de forma similar en cuanto al voltaje.

Lo comentado en el párrafo anterior se puede deber a dos factores fundamentales, al no poder medir la intensidad de entrada a la cámara, y sobre todo al no poder controlarla, así no podemos ver el comportamiento de la temperatura de la cámara en función de esta, y sería de esperar una fuerte dependencia. Otro factor que no se ha tenido en cuenta es la temperatura en el exterior de la cámara, es decir del medio ambiente que la rodea, factor que también debe de tener una fuerte dependencia con la temperatura de la cámara ya que esta no se encuentra especialmente aislada.

El valor máximo de temperatura de la cámara ha sido 38.44 °C y el mínimo 27.02 °C valores que permiten trabajar perfectamente con material sensible.

### 6.2.4. Espectro

Tal y como aparece en el punto 5.4.2 de la presente tesis las longitudes de onda estudiadas son las once siguientes:

Longitud de onda ( $\lambda$ ) en nm
290.41
314.44
335.89
356.62
379.53
403.02
425.97
661.36
772.47
866.34
888.78

**Tabla 6.4 Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

El programa de análisis e identificación de espectros Plusus SpecLine Versión 2.13 identifica los siguientes picos:

- Inferior: Inf.
- Superior: Sup.

Elemento	Línea [nm]	I (rel.)	Energía [eV]		Transición		Número cuántico		Comentario
			Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	
C III	315.5073	12	38.22	42.15	3s' <sup>3</sup> P°	5s <sup>3</sup> S	1	1	
CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	315.52	500			X <sup>2</sup> Pi	A <sup>2</sup> Pi			Fox, Duffendack y Barker's System
N III	336.736	1231	35.67	39.35	3p' 4P°	3p' 4P	2½	2½	
O IV	336.865	28	71.52	75.20	3s 4P	3p 4P°	½	½	
N I	357.2	1	10.33	13.80	3s 4P	5p 4P	½	½	
NO	357.24	1000	0.00	5.69	X <sup>2</sup> Pi	B <sup>2</sup> Pi	10	0	
N IV	374.754	971	58.65	61.96	3s' <sup>1</sup> P°	3p' <sup>1</sup> D	1	2	
O III	374.6899	258	46.47	49.78	3p' <sup>3</sup> D°	3d' <sup>3</sup> F	3	3	
O V	374.664	163	84.02	87.33	3p' <sup>3</sup> D	3d' <sup>3</sup> D°	3	3	
H <sub>2</sub>	374.6283	45	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	0	2	R5-Linie
H <sub>2</sub>	374.7361	0	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	s <sup>3</sup> Del(g)	0	2	P4-Linie
H <sub>2</sub>	374.8039	160	11.37		B <sup>1</sup> Sig+u	<sup>1</sup> (2*)	0	2	P1-Linie
N III	375.263	15	38.39	41.70	3p 4D	3d 4P°	½	½	
O II	375.2089	0	25.64	28.94	3p 4D°	3d <sup>2</sup> P	1½	1½	
C <sub>3</sub> H <sub>5</sub>	375.2	0							
H <sub>2</sub>	375.1887	340	11.37		B <sup>1</sup> Sig+u	<sup>1</sup> (2*)	0	2	P4-Linie
H <sub>2</sub>	375.2622	180	11.37	14.06	B <sup>1</sup> Sig+u	J <sup>1</sup> Del(g)	0	2	R2-Linie
NH	375.18	0	0.00	3.69	X <sup>3</sup> Sig	A <sup>3</sup> Pi	1	0	Q2-Linie

H	379.79	2	10.20	13.46	2p <sup>3</sup> P <sup>o</sup>	10d <sup>2</sup> D	½	1½	
H <sub>2</sub>	379.6904	68	11.37	14.86	B <sup>1</sup> Sig+u	S <sup>1</sup> Del(g)	1	0	Q3-Linie
H <sub>2</sub>	379.7521	230	11.37	13.98	B <sup>1</sup> Sig+u	G <sup>1</sup> Sig+g	1	3	R0-Linie
H <sub>2</sub>	379.7917	180	11.37	14.02	B <sup>1</sup> Sig+u	I <sup>1</sup> Pi(g)	1	3	Q1-Linie
H <sub>2</sub>	379.884	140	11.37	14.86	B <sup>1</sup> Sig+u	S <sup>1</sup> Del(g)	1	0	P4-Linie
C <sub>3</sub>	399.08	600			<sup>1</sup> Sig+g	<sup>1</sup> Pi(u)			Comet-Head System
H <sub>2</sub>	399.0765	68	11.37	14.86	B <sup>1</sup> Sig+u	S <sup>1</sup> Del(g)	2	0	P4-Linie
H <sub>2</sub>	399.0954	68	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	0	1	R3-Linie
H <sub>2</sub>	399.1514	91	11.37	14.06	B <sup>1</sup> Sig+u	J <sup>1</sup> Del(g)	1	2	P3-Linie
H <sub>2</sub>	399.1842	340	11.37	13.98	B <sup>1</sup> Sig+u	G <sup>1</sup> Sig+g	2	3	R0-Linie
H <sub>2</sub>	399.2012	200	11.37	14.02	B <sup>1</sup> Sig+u	I <sup>1</sup> Pi(g)	2	3	Q1-Linie
H <sub>2</sub>	399.2122	800	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	s <sup>3</sup> Del(g)	1	2	R2-Linie
C I	404.6231	0	7.95	11.01	1s2p <sup>3</sup> <sup>3</sup> D	8p <sup>3</sup> D	3	2	
C I	404.6711	1	7.95	11.01	1s2p <sup>3</sup> <sup>3</sup> D	8p <sup>3</sup> D	1	2	
C I	404.6891	1	7.95	11.01	1s2p <sup>3</sup> <sup>3</sup> D	8p <sup>3</sup> D	2	2	
O II	404.6118	15	28.69	31.76	3d 4F	4f 4F <sup>o</sup>	3½	4½	
H <sub>2</sub>	404.5479	160	11.37	14.02	B <sup>1</sup> Sig+u	I <sup>1</sup> Pi(g)	1	2	R0-Linie
H <sub>2</sub>	404.5592	45	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	s <sup>3</sup> Del(g)	1	2	Q4-Linie
H <sub>2</sub>	404.6201	68	11.89	15.00	a <sup>3</sup> Sig+g	n <sup>3</sup> Pi(u)	0	0	P2-Linie
H <sub>2</sub>	404.6202	68	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	0	1	Q2-Linie
H <sub>2</sub>	404.6807	0	11.87	14.70	c <sup>3</sup> Pi(u)	r <sup>3</sup> Pi(g)	0	1	R6-Linie
C I	405.1191	1	7.95	11.01	1s2p <sup>3</sup> <sup>3</sup> D	8p <sup>1</sup> P	1	1	
C I	405.1372	0	7.95	11.01	1s2p <sup>3</sup> <sup>3</sup> D	8p <sup>1</sup> P	2	1	
CN	405.05	0	0.00	3.19	X <sup>2</sup> Sig+	B <sup>2</sup> Sig+	18	19	Violetes System, Tail Bande
H <sub>2</sub>	405.0477	68	11.37	14.12	B <sup>1</sup> Sig+u	H <sup>1</sup> Sig+g	2	2	R2-Linie
H <sub>2</sub>	405.0938	23	11.89	15.00	a <sup>3</sup> Sig+g	n <sup>3</sup> Pi(u)	1	1	R2-Linie
H <sub>2</sub>	405.0938	23	11.87	14.69	c <sup>3</sup> Pi(u)	s <sup>3</sup> Del(g)	2	3	Q4-Linie
H <sub>2</sub>	405.1227	180	11.37		B <sup>1</sup> Sig+u	<sup>1</sup> (2*)	0	1	P5-Linie
C III	405.449	1	42.32	45.38	3d <sup>1</sup> F <sup>o</sup>	7d <sup>1</sup> D	3	2	
C III	405.6061	370	40.20	43.25	4d <sup>1</sup> D	5f <sup>1</sup> F <sup>o</sup>	2	3	
O I	405.477	1	12.36	15.42	4p <sup>3</sup> P	3d <sup>3</sup> S <sup>o</sup>	1	1	
O I	405.479	1	12.36	15.42	4p <sup>3</sup> P	3d <sup>3</sup> S <sup>o</sup>	2	1	
O I	405.483	0	12.36	15.42	4p <sup>3</sup> P	3d <sup>3</sup> S <sup>o</sup>	0	1	
O I	405.6064	0	12.54	15.60	3s <sup>1</sup> <sup>3</sup> D	4f <sup>2</sup> [3] <sup>o</sup>	3	2	
O II	405.4521	0	31.15	34.20	3d <sup>2</sup> F	4f <sup>2</sup> [3] <sup>o</sup>	2½		
O II	405.4745	49	31.15	34.20	3d <sup>1</sup> <sup>2</sup> F	4f <sup>1</sup> <sup>2</sup> F <sup>o</sup>	2½	3½	
O II	405.4745	1048	31.15	34.20	3d <sup>1</sup> <sup>2</sup> F	4f <sup>1</sup> <sup>2</sup> F <sup>o</sup>	2½	2½	
H <sub>2</sub>	405.4801	0			c <sup>3</sup> Pi(u)	<sup>3</sup> Pi	1	0	R1-Linie
H <sub>2</sub>	405.5288	180	11.37		B <sup>1</sup> Sig+u	<sup>1</sup> (2*)	0	1	P6-Linie
H <sub>2</sub>	405.6416	180	11.37	14.02	B <sup>1</sup> Sig+u	I <sup>1</sup> Pi(g)	1	2	Q5-Linie
C III	425.6373	1	39.92	42.84	4f <sup>3</sup> F <sup>o</sup>	5d <sup>3</sup> D	3	3	
C III	425.6451	6	39.92	42.84	4f <sup>3</sup> F <sup>o</sup>	5d <sup>3</sup> D	3	2	
C III	425.675	10	42.17	45.08	3d <sup>3</sup> P <sup>o</sup>	7s <sup>3</sup> S	1	1	
C III	425.7894	7	39.93	42.84	4f <sup>3</sup> F <sup>o</sup>	5d <sup>3</sup> D	4	3	
O II	425.7544	525	28.84	31.75	3d 4P	4f 4F <sup>o</sup>	½	1½	
H <sub>2</sub>	425.673	91	11.37		B <sup>1</sup> Sig+u	<sup>1</sup> (2*)	0	1	P3-Linie
H <sub>2</sub>	425.7232	0	11.87	14.03	c <sup>3</sup> Pi(u)	j <sup>3</sup> Del(g)	0	3	P3-Linie
H <sub>2</sub>	425.7491	0	11.37		c <sup>3</sup> Pi(u)	<sup>1</sup> (2*)	3	2	P3-Linie
H <sub>2</sub>	425.8099	0	11.87	14.69	B <sup>1</sup> Sig+u	p <sup>2</sup> Sig+g	1	2	P6-Linie
N I	426.1283	12	10.33	13.24	3s 4P	4p 4D	1½	1½	
O II	426.1847	0	31.32	34.23	3d <sup>1</sup> <sup>2</sup> G	4f <sup>2</sup> D <sup>o</sup>	3½	2½	
H <sub>2</sub>	426.1626	0	11.37	14.72	B <sup>1</sup> Sig+u	R <sup>1</sup> Pi(g)	3	0	Q3-Linie

Tabla 6.5 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

Aceptando como máximo una diferencia en la longitud de onda de 5 nm entre los picos identificados por un software y el otro, tenemos que las especies reactivas que aparecen son:

C I , C III , C<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>, H, O I, O II, O III, O IV, O V, N III, N IV, CN, N I, NH, NO.

El hidrógeno en todas sus formas se debe a la humedad del aire y el C aparece como contaminante, ya que no se encuentra en el aire cero, en principio debería haber desaparecido en durante la producción de éste.

Con el fin de poder relacionar más fácilmente las especies reactivas con los picos construimos la siguiente tabla:

Identificador	Longitud de onda ( $\lambda$ ) en nm	Especie reactiva
1	290.41	-
2	314.44	C III CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>
3	335.89	N III O IV
4	356.62	N I NO
5	379.53	H <sub>2</sub> N III N IV C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> NH H O II O III O V
6	403.02	H <sub>2</sub> C I C <sub>3</sub> O II CN CIII O I
7	425.97	C III N I H <sub>2</sub>

		O II
8	661.36	-
9	772.47	-
10	866.34	-
11	888.78	-

**Tabla 6.6 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda con especies reactiva del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

Vemos que existen cinco picos que no identifican ninguna especie reactiva, el 1, 8, 9, 10 y el 11.

En todo caso, tal y como se puede ver en el punto 2.4.1 apéndice III, de cada uno de los picos se ha tomado la altura de pico y el área, por lo que para este caso nos daría 22 variables primitivas. Que hemos conseguido reducir a un único factor con el fin de simplificar el número de correlaciones.

El comportamiento del Factor A con respecto a la altura y el área de los picos es el siguiente:

- a. Cuando el Factor A tiene un valor positivo elevado las alturas de los picos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 es elevada, en cambio la del pico 1 es baja.
- b. En cuanto a las áreas, si el Factor A es elevado, las áreas de los picos 3 y 4 son elevadas, y pequeñas las de los picos 2 y 5.

Tal y como se puede ver en el punto 2.4.2 del apéndice III el Factor A aumenta al aumentar el Voltaje y la frecuencia (aunque su nivel de significación estadística no es evidente), mientras que disminuye cuando aumenta el grosor del dieléctrico; sobre la humedad inicial no se ha observado ningún efecto significativo. Esto quiere decir lo siguiente:

- a. La altura de los picos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 aumenta cuando aumenta el voltaje y la frecuencia, y la del pico 1 disminuye conforme aumenta el voltaje y la frecuencia.
- b. La altura de los picos 2, 3, 4, 5 y 6 disminuye cuando aumenta el grosor del dieléctrico, y la del pico 1 aumenta conforme aumenta el grosor del dieléctrico.
- c. En cuanto a las áreas, cuando el voltaje y la frecuencia aumentan, aumenta las áreas de los picos 3 y 4, y disminuyen la de los picos 2 y 5, y cuando el grosor del dieléctrico aumenta,

- el área de los picos 3 y 4 disminuye, y la de los picos 2 y 5 aumenta.
- d. La humedad en este caso no afecta a la altura ni anchura de ningún pico

### **6.3. Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

#### **6.3.1. La Intensidad de corriente**

Como ya se ha mencionado en esta tesis, aunque la intensidad de corriente con otro amplificador de tensión distinto es posible que pueda ser establecida por el operador como variable de entrada del sistema, en nuestro amplificador no es posible establecerla, de este modo, aunque no es un parámetro característico del plasma ni un parámetro que afecte a las muestras a descontaminar, sí que es un parámetro que varía en función de otros parámetros que fija el operador del sistema. En nuestro sistema solo puede establecerse el valor máximo de Intensidad, no es posible establecer un valor fijo.

La variación que presenta la intensidad de corriente que circula por el APPJ-NTP tal y como se puede ver en el punto 3.1 del apéndice III de la presente tesis, depende de las variables de entrada de la siguiente manera:

- a. Cuando el voltaje aumenta, aumenta la intensidad de corriente.
- b. Cuando la frecuencia aumenta, aumenta la intensidad de corriente.
- c. Cuando el grosor del electrodo de potencia aumenta, aumenta la intensidad de corriente.
- d. La humedad del aire cero no tiene ningún efecto significativo sobre el aumento o disminución de la intensidad de corriente.
- e. El caudal de aire cero no tiene ningún efecto significativo sobre el aumento o disminución de la intensidad de corriente.

El aumento de la intensidad de corriente, con el voltaje, la frecuencia y el espesor del electrodo de potencia era esperable. En todo caso sería interesante el disponer de un sistema que permitiese fijar el valor de la

intensidad al deseado con el fin de tratar esta variable como independiente.

### **6.3.2. Temperatura de la muestra**

La temperatura de la muestra es otra variable que no es demasiado importante si sólo se tratara de producir plasma. Pero de hecho el sistema APPJ-NTP tiene como objetivo producir plasma a temperatura ambiente con el fin poder descontaminar material sensible y material biológico, por otro lado también es interesante mantener la temperatura en la muestra lo más baja posible con el fin de garantizar que la descontaminación biológica, en caso de producirse, se deba exclusivamente al efecto del plasma y no a efectos térmicos.

Con todo, el comportamiento de la temperatura con respecto a las variables de entrada se comporta de la siguiente manera:

- a. La temperatura de la muestra aumenta conforme aumenta el voltaje, aunque a valores altos de voltaje estos incrementos de temperatura se notan menos.
- b. La temperatura de la muestra se mantiene mínima para espesores del electrodo del orden de 9.5 mm aumentando para espesores superiores e inferiores a éste.
- c. La temperatura de la muestra disminuye al aumentar el caudal.
- d. La temperatura de la muestra aumenta ligeramente cuando aumenta la humedad del aire cero.

El punto a) es fácilmente explicable ya que al aumentar el voltaje aumenta también la intensidad de corriente y la temperatura del electrodo de potencia, por lo que el aire y plasma dirigidos a la muestra aumenta.

En cuanto al punto b) influyen dos factores, por un lado, el hecho de que a mayor grosor del dieléctrico menor espacio de paso de aire, y por otro lado, menos se calienta debido a la intensidad de corriente. Luego, el flujo de aire cero que impacta con la muestra se calienta en función de estos dos efectos contrarios, de ahí que aparezca ese mínimo.

En cuanto al caudal de aire, es obvio que al aumentar el caudal por un lado aumenta la velocidad de paso, y por otro aumenta la capacidad de refrigeración.

En este caso también sería interesante conocer la evolución temporal de la temperatura con el tiempo, y no sólo la temperatura a 120 s, ya que si son necesarios tiempos largos de irradiación puede ser un factor clave.

En todo caso el valor más elevado de temperatura a los 120 s ha sido de 41.08 °C y el valor mínimo de 26.88 °C, por lo que no supone problema alguno para material sensible, al menos irradiando 120 s. Aunque sí puede suponer un problema para saber si la descontaminación biológica se produce por efecto del plasma o por efecto de la temperatura. Esto implica que no todas las combinaciones de parámetros deberán ser usadas a fin de utilizarlo como sistema de descontaminación biológica.

### 6.3.3. Espectro

Tal y como aparece en el punto 5.4.3 de la presente tesis las longitudes de onda estudiadas son las once siguientes:

Longitud de onda ( $\lambda$ ) en nm
296.291
314.554
335.842
356.680
379.263
404.510
425.817
663.518
772.456
868.666
888.024

Tabla 6.7 Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.

El programa de análisis e identificación de espectros Plusus SpecLine Versión 2.13 identifica los siguientes picos:

- Inferior: Inf.
- Superior: Sup.

Elemento	Línea [nm]	I (rel.)	Energía [eV]		Transición		Número cuántico		Comentario
			Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	
C III	315.5073	12	38.22	42.15	3s' <sup>3</sup> P <sup>o</sup>	5s <sup>3</sup> S	1	1	
CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	315.52	500			X <sup>2</sup> Pi	A <sup>2</sup> Pi			Fox, Duffendack y Barker's System

N III	336.736	1231	35.67	39.35	3p' 4P°	3p' 4P	2½	2½	
O IV	336.865	28	71.52	75.20	3s 4P	3p 4P°	½	½	
N I	357.2	1	10.33	13.80	3s 4P	5p 4P	½	½	
NO	357.24	1000	0.00	5.69	X²Pi	B²Pi	10	0	
H	379.79	2	10.20	13.46	2p ²P°	10d ²D	½	1½	
H <sub>2</sub>	379.6904	68	11.37	14.86	B¹Sig+u	S¹Del(g)	1	0	Q3-Linie
H <sub>2</sub>	379.7521	230	11.37	13.98	B¹Sig+u	G¹Sig+g	1	3	R0-Linie
H <sub>2</sub>	379.7917	180	11.37	14.02	B¹Sig+u	I¹Pi(g)	1	3	Q1-Linie
H <sub>2</sub>	379.884	140	11.37	14.86	B¹Sig+u	S¹Del(g)	1	0	P4-Linie

**Tabla 6.8 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.**

Aceptando como máximo una diferencia en la longitud de onda de 5 nm entre los picos identificados por un software y el otro tenemos que las especies reactivas que aparecen son:

C III , CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>, H, O IV N III, N I, y NO.

El hidrógeno en todas sus formas se debe a la humedad del aire y el C aparece como contaminante, ya que no se encuentra en el aire cero, en principio debería haber desaparecido durante la producción de éste.

Con el fin de poder relacionar más fácilmente las especies reactivas con los picos construimos la siguiente tabla:

Identificador	Longitud de onda (λ) en nm	Especie reactiva
1	290.41	-
2	314.44	C III CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>
3	335.89	N III O IV
4	356.62	N I NO
5	379.53	H <sub>2</sub> H
6	403.02	-
7	425.97	-
8	661.36	-
9	772.47	-
10	866.34	-
11	888.78	-

**Tabla 6.9 Identificación de Picos del espectro de longitudes de onda con especies reactiva del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.**

Vemos que existen siete picos que no identifican ninguna especie reactiva, el 1,6,7,8, 9, 10 y el 11.

Tal y como se puede ver en el punto 3.3.1 del apéndice III, de cada uno de los picos se ha tomado la altura de pico y el área por lo que para este caso nos daría 22 variables primitivas. Que hemos conseguido reducir a un único factor con el fin de simplificar el número de correlaciones.

El comportamiento del Factor A con respecto a la altura y el área de los picos es el siguiente:

- a. Cuando el Factor A tiene un valor positivo elevado, las alturas de los picos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 y 11 es elevada, en menor medida con el 8.
- b. En cuanto a las áreas, si el Factor A es elevado, las áreas de los picos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 y 11 son elevadas, y pequeñas las de los picos 8.

Tal y como se puede ver en el punto 3.3.2 del apéndice III, el Factor A aumenta al aumentar el Voltaje y la frecuencia, aunque bien es verdad, que en ambos casos dicho aumento es menor conforme se incrementan los valores de estas. En cuanto al grosor del electrodo de potencia, éste presenta un factor máximo para un electrodo de 9.7 mm, disminuyendo para valores menores o mayores que este y por último dicho Factor A disminuye conforme aumenta el valor de la humedad y el valor del caudal. Esto se traduce en lo siguiente:

- a. La altura de los picos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 y 11 aumentan cuando aumenta el voltaje y la frecuencia, es máximo para un grosor de electrodo de potencia de 9.7 mm y disminuye conforme aumenta el caudal y la humedad. En cuanto al pico 8 se produce el mismo efecto pero en mucha menor medida.
- b. En cuanto a las áreas de los picos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 y 11 se comportan como la altura de los picos. El área del pico 8 se comporta de forma inversa a su altura es decir disminuye aumenta conforme aumenta el voltaje y la frecuencia y aumenta conforme aumenta el valor del caudal y la humedad.



# Capítulo 7:

# Conclusiones

## 7.1. Conclusiones

Las conclusiones las vamos a estudiar por separado para cada uno de los sistemas, aunque trataremos de ver si existe algún tipo de similitud entre ellos, de forma que se pueda generalizar de alguna manera.

Puesto que el objetivo final de estos sistemas es la descontaminación o esterilización biológica de material sensible o material biológico, como piel o heridas, en las conclusiones se hará referencia a este objetivo.

### 7.1.1. Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

En lo referente al tema de temperaturas, este sistema es apto para intentar la descontaminación de material sensible debido a que las temperaturas que se alcanzan tanto en la muestra como en el interior de la cámara se mantienen por debajo de los 32.12 °C, lo que lo hace óptimo para material sensible e incluso para la descontaminación biológica de piel y heridas debido a que no se producirían quemaduras, aunque para esta última práctica se necesitaría conocer el daño biológico que podría causar el plasma, y por lo tanto sería necesario abrir otra línea de investigación.

Por otro lado en cuanto a las especies reactivas, o lo que es lo mismo el comportamiento de los picos, se puede observar que los que presentan más altura y mejor definición son los picos 3 y 4 que corresponden a las longitudes de onda 335.981 nm y 356.402 nm y a

las especies reactivas N I, N III, O III, O IV, NO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O y C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>CHO. Éstas son producidas principalmente por el nitrógeno y oxígeno, ya que trabajamos con aire cero. Éstas muestran un máximo de altura de pico cuando se trabaja con dieléctrico de 1 mm de espesor, con un voltaje de entrada de 20 kV, a una frecuencia de 1 kHz y una humedad inicial del 0%. Pese a eso, debido a problemas de ruptura del dieléctrico en tiempos breves y a los problemas experimentales que conlleva, en esta tesis llegamos a la conclusión que los parámetros óptimos a probar para intentar la descontaminación y la esterilización biológica deben ser los siguientes: dieléctrico de 1.5 mm de espesor, voltaje de 19 kV y frecuencia de 1 kHz, ya que de esta manera la altura de los picos, es decir la producción de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno es elevada, evitando además los problemas de ruptura de dieléctrico. En cuanto a la humedad inicial, debido a la dificultad de controlarla con este sistema, recomendamos mantenerla al 0%. Otra posibilidad sería probar con un sistema más preciso de control de humedad.

#### **7.1.2. Sistema APPC-NTP con amplificador GBS Elektronik modelo Minipuls 4.**

En cuanto a temperaturas, este equipo no ha superado en el interior de cámara los 38.44 °C, haciendo que este sea un buen equipo, como en el caso anterior, para intentar la descontaminación o esterilización biológica de material sensible o material biológico.

Por otro lado, en cuanto a las especies reactivas, o lo que es lo mismo el comportamiento de los picos, podemos observar que los que tienen más altura y mejor definición son los picos 3 y 4, es decir los correspondientes a las longitudes de onda de 335.89 nm y 356.62 nm y especies reactivas N I, N III, O IV y NO. Éstas son producidas exclusivamente por nitrógeno y oxígeno del aire cero. Mostrando un máximo de altura de pico cuando se trabaja con un espesor de dieléctrico de 0.5 mm, un voltaje de 14.72 kV, una frecuencia de 6 kHz y una humedad inicial del 57%.

El sistema presenta unas alturas y definiciones mejores que con el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS en todos los picos, ya que se alcanzan mayores alturas y mejor

definición, por consiguiente un mayor número de moléculas reactivas.

Puesto que el diseño de este sistema y el del punto anterior son idénticos, ambos se podrían utilizar en las mismas aplicaciones de descontaminación biológica, y puesto que este sistema es capaz de crear más moléculas reactivas a priori sería un sistema más eficiente y recomendable que el anterior.

Pese a esto, este sistema no es recomendable debido a la inestabilidad de su amplificador, por lo que si no se consigue subsanar este problema modificando el diseño del amplificador, queda descartado su uso en posteriores trabajos.

### **7.1.3. Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

En lo referente al tema de temperaturas este sistema es apto para intentar la descontaminación de material sensible debido a que la temperatura que se alcanza en las superficie de la muestra en el caso más desfavorable es de 41.08 °C, y en el caso del óptimo, que veremos más adelante, la temperatura no supera los 33.58 °C. Ésto lo hace apto para este material y para la descontaminación biológica de piel y heridas debido a que no se producirían quemaduras, aunque para esta última práctica se necesitaría conocer el daño biológico que podría causar el plasma y por lo tanto se debería abrir otra línea de investigación.

En cuanto a las especies reactivas, o lo que es lo mismo, el comportamiento de los picos, observamos que los que tienen más altura y mejor definición son los picos 3 y 4, que corresponden a las longitudes de onda 335.89 nm y 356.62 nm y a las especies reactivas N I, N III, O IV, NO. Éstas son debidas al nitrógeno y oxígeno ya que trabajamos con aire cero y muestran un máximo de altura de pico cuando se trabaja con un grosor de electrodo de potencia de 9.5 mm, con el voltaje de entrada de 20.4 kV , a una frecuencia de 2 kHz, un caudal de 15 l/min y una humedad del aire del 0%.

En esta tesis se eligen como óptimos para intentar la descontaminación biológica los siguientes parámetros: Grosor del

electrodo de potencia 9 mm, voltaje 20.4 kV, frecuencia 2 kHz, humedad del aire cero 0% y caudal de aire cero 10 l/min.

El cambio en el grosor del electrodo de potencia tiene como objetivo evitar problemas de ruptura dieléctrica del aire producidos por la temperatura interior del jet y aumentar la distancia entre el dieléctrico de cuarzo con el electrodo de potencia. El cambio del caudal del aire cero tiene como objetivo evitar la dispersión del contaminante debido a un exceso de caudal.

Debido a la dificultad de controlar la humedad con este sistema, se recomienda mantenerla al 0%. Otra posibilidad sería disponer de un sistema más preciso de control de humedad.

## **7.2. Líneas futuras de trabajo**

Esta tesis abre numerosas posibilidades para futuros trabajos de investigación en diversos campos de aplicación:

- Una primera línea de investigación sería el estudio químico de los gases producidos en el interior de la cámara del sistema APPC-NTP o en el interior del Jet del sistema APPJ-NTP, en función del gas utilizado para la generación del plasma, de los materiales de construcción y de las muestras a irradiar.
- Una segunda línea de investigación giraría en torno al estudio de otros materiales constructivos tanto del dieléctrico como de la cámara, ya que el politetrafluoroetileno (PTFE) contiene flúor y por lo tanto puede ser bastante tóxico en caso de liberarse al medio ambiente, por lo que se podría probar con otros polímeros libres de flúor u otros tipos de materiales. En el caso del sistema APPC-NTP también se puede estudiar otros materiales de dieléctrico con el fin de evitar la ruptura de este por desgaste del politetrafluoroetileno (PTFE).
- Se podría abrir otra línea de investigación en el campo de la descontaminación biológica. Llevando a cabo estudios de la eficiencia de descontaminación en función de diferentes parámetros tales como voltaje, amperaje, frecuencia, tiempo de exposición, tipo de gas inyectado, tipo de material biológico a descontaminar o esterilizar, tipo de bacteria, tipo de virus, esporas, biofilms etc.
- El estudio de las diferentes sensibilidades al plasma en función del tipo de población celular y tipo de célula, con el fin de tratar de

aplicar plasma en la descontaminación “in vivo” en caso de infecciones resistentes a otros tratamientos como al tratamiento con antibióticos abre otra línea de investigación.

- También se puede estudiar la posibilidad de descontaminación química debido a la rotura molecular de compuestos químicos.

Como se puede ver, esta tesis da pie a un amplio abanico de futuras líneas de trabajo en diferentes campos de aplicación: ámbito médico y hospitalario, ámbito de descontaminación química, ámbito militar y de lucha antiterrorista y ámbito de la ingeniería con el desarrollo de nuevos prototipos con diferentes configuraciones y materiales.



---

# Referencias

1. Alshraiedeh NH, Alkawareek MY, Gorman SP, Graham WG, Gilmore BF. Atmospheric pressure, nonthermal plasma inactivation of MS2 bacteriophage: effect of oxygen concentration on virucidal activity. *J Appl Microbiol.* diciembre de 2013;115(6):1420-6.
2. Bayliss DL, Walsh JL, Shama G, Iza F, Kong MG. Reduction and degradation of amyloid aggregates by a pulsed radio-frequency cold atmospheric plasma jet. *New J Phys.* 26 de noviembre de 2009;11(11):115024
3. Cahill OJ, Claro T, O'Connor N, Cafolla AA, Stevens NT, Daniels S, et al. Cold Air Plasma To Decontaminate Inanimate Surfaces of the Hospital Environment. *Appl Environ Microbiol.* 15 de marzo de 2014;80(6):2004-10
4. Cheng C, Peng L, Lei X, Li-Ye Z, Ru-Juan Z, Wen-Rui Z. Development of a new atmospheric pressure cold plasma jet generator and application in sterilization. *Chin Phys.* 2006;15(7):1544.
5. Daeschlein G, Scholz S, Ahmed R, von Woedtke T, Haase H, Niggemeier M, et al. Skin decontamination by low-temperature atmospheric pressure plasma jet and dielectric barrier discharge plasma. *J Hosp Infect.* julio de 2012;81(3):177-83
6. Diener Plasma Surface Technology. 2007
7. Dobrynin D, Fridman G, Mukhin YV, Wynosky-Dolfi MA, Rieger J, Rest RF, et al. Cold Plasma Inactivation of *Bacillus cereus* and *Bacillus anthracis* (Anthrax) Spores. *IEEE Trans Plasma Sci.* agosto de 2010;38(8):1878-84
8. EPA United States Environmental Protection Agency; (Terms of environment). Zero Air 10 Marzo 2017.

9. Fitzpatrick Richard. Plasma Physics: An Introduction. CRC Press, Taylor & Francis Group; 2014. 293 Pages
10. Gweon B, Kim DB, Moon SY, Choe W. Escherichia coli deactivation study controlling the atmospheric pressure plasma discharge conditions. *Curr Appl Phys.* mayo de 2009;9(3):625-8
11. Guimin X, Guan Jun Z, Xingmin S, Yue M, Ning W, Yuan L. Bacteria inactivation using DBD plasma jet in atmospheric pressure argon. *Plasma Sci Technol.* 2009;11(1):83.
12. Hans-Erich Wagner and Ronny Brandenburg. Atmospheric Pressure Plasmas. 1 European Summer School on Plasma Applications in Material Science (PAMS-2011) ;; 2011 Summer.
13. Hayashi N, Akiyoshi Y, Kobayashi Y, Kanda K, Ohshima K, Goto M. Inactivation characteristics of Bacillus thuringiensis spore in liquid using atmospheric torch plasma using oxygen. *Vacuum.* febrero de 2013;88:173-6.
14. Herrmann HW, Henins I, Park J, Selwyn GS. Decontamination of chemical and biological warfare (CBW) agents using an atmospheric pressure plasma jet (APPJ). *Phys Plasmas.* 1999;6(5):2284.
15. Herrmann HW, Selwyn GS, Henins I, Jaeyoung Park, Jeffery M, Williams JM. Chemical warfare agent decontamination studies in the plasma decon chamber. *IEEE Trans Plasma Sci.* agosto de 2002;30(4):1460-70
16. Kang W-S, Hong Y-C, Hong Y-B, Kim J-H, Uhm HS. Atmospheric-pressure cold plasma jet for medical applications. *Surf Coat Technol.* diciembre de 2010;205:S418-21.
17. Kim H. K., Shi F. G. PTFE\_dielectric\_strength\_young's modulus.pdf. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul.* abril de 2001;Val. 8 No. 2,.
18. Klämpfl TG, Isbary G, Shimizu T, Li Y-F, Zimmermann JL, Stolz W, et al. Cold Atmospheric Air Plasma Sterilization against Spores and Other Microorganisms of Clinical Interest. *Appl Environ Microbiol.* 1 de agosto de 2012;78(15):5077-82
19. Klämpfl TG. Cold atmospheric plasma decontamination against nosocomial bacteria [Internet]. Citeseer; 2014 [citado 25 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.689.1706&rep=rep1&type=pdf>

20. Kogelschatz. U. FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC-BARRIER DISCHARGES. ABB Corporate Research Ltd; 2000
21. Kolb JF, Mohamed A-AH, Price RO, Swanson RJ, Bowman A, Chiavarini RL, et al. Cold atmospheric pressure air plasma jet for medical applications. *Appl Phys Lett*. 16 de junio de 2008;92(24):241501
22. Kostov KG, Nishime TMC, Castro AHR, Toth A, Hein LRO. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. *Appl Surf Sci*. septiembre de 2014;314:367-75.
23. Kuo SP, Bivolaru D, Lai H, Lai W, Popovic S, Kessaratikoon P. Characteristics of an Arc-Seeded Microwave Plasma Torch. *IEEE Trans Plasma Sci*. agosto de 2004;32(4):1734-41.
24. Lai W, Lai H, Kuo SP, Tarasenko O, Levon K. Decontamination of biological warfare agents by a microwave plasma torch. *Phys Plasmas*. febrero de 2005;12(2):023501
25. Lackmann J-W, Bandow JE. Inactivation of microbes and macromolecules by atmospheric-pressure plasma jets. *Appl Microbiol Biotechnol*. julio de 2014;98(14):6205-13.
26. Li Y-F, Shimizu T, Zimmermann JL, Morfill GE. Cold Atmospheric Plasma for Surface Disinfection. *Plasma Process Polym*. junio de 2012;9(6):585-9.
27. Li Z, Li Y, Cao P, Zhao H. Surface Decontamination of Chemical Agent Surrogates Using an Atmospheric Pressure Air Flow Plasma Jet. *Plasma Sci Technol*. julio de 2013;15(7):696-701.
28. Li Z, Hu Z, Cao P, Zhao H. Decontamination of 2-Chloroethyl Ethyl Sulfide by Pulsed Corona Plasma. *Plasma Sci Technol*. noviembre de 2014;16(11):1054-8
29. Lu X, Jiang Z, Xiong Q, Tang Z, Hu X, Pan Y. An 11cm long atmospheric pressure cold plasma plume for applications of plasma medicine. *Appl Phys Lett*. 25 de febrero de 2008;92(8):081502
30. Lu X, Xiong Z, Zhao F, Xian Y, Xiong Q, Gong W, et al. A simple atmospheric pressure room-temperature air plasma needle device for biomedical applications. *Appl Phys Lett*. 2009;95(18):181501.
31. Lu X, Laroussi M, Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Sci Technol*. 1 de junio de 2012;21(3):034005.

32. Lu X, Naidis GV, Laroussi M, Ostrikov K. Guided ionization waves: Theory and experiments. *Phys Rep.* julio de 2014;540(3):123-66
33. Machala Z, Hensel K, Akishev Y, editores. *Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security* [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2012 [citado 21 de mayo de 2017]. (NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology). Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-2852-3>
34. Mai-Prochnow A, Murphy AB, McLean KM, Kong MG, Ostrikov K (Ken). Atmospheric pressure plasmas: Infection control and bacterial responses. *Int J Antimicrob Agents.* junio de 2014;43(6):508-17.
35. Moeller TM, Alexander ML, Engelhard MH, Gaspar DJ, Luna ML, Irving PM. Surface decontamination of simulated chemical warfare agents using a nonequilibrium plasma with off-gas monitoring. *IEEE Trans Plasma Sci.* agosto de 2002;30(4):1454-9.
36. Morfill GE, Shimizu T, Steffes B, Schmidt H-U. Nosocomial infections—a new approach towards preventive medicine using plasmas. *New J Phys.* 26 de noviembre de 2009;11(11):115019.
37. Mott-Smith HM. History of ``Plasmas''. *Nature.* septiembre de 1971;233:219.
38. Nehra V, Kumar A, Dwivedi HK. Atmospheric non-thermal plasma sources. *Int J Eng.* 2008;2(1):53–68.
39. Niemira BA. Cold Plasma Decontamination of Foods. *Annu Rev Food Sci Technol.* 10 de abril de 2012;3(1):125-42
40. O'Connor N, Cahill O, Daniels S, Galvin S, Humphreys H. Cold atmospheric pressure plasma and decontamination. Can it contribute to preventing hospital-acquired infections? *J Hosp Infect.* octubre de 2014;88(2):59-65
41. Park GY, Park SJ, Choi MY, Koo IG, Byun JH, Hong JW, et al. Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications. *Plasma Sources Sci Technol.* 1 de agosto de 2012;21(4):043001
42. Patil S, Moiseev T, Misra NN, Cullen PJ, Mosnier JP, Keener KM, et al. Influence of high voltage atmospheric cold plasma process parameters and role of relative humidity on inactivation of *Bacillus atrophaeus* spores inside a sealed package. *J Hosp Infect.* noviembre de 2014;88(3):162-9.

43. Pei X, Liu J, Xian Y, Lu X. A battery-operated atmospheric-pressure plasma wand for biomedical applications. *J Phys Appl Phys.* 9 de abril de 2014;47(14):145204.
44. Peña D. *Análisis de Datos Multivariantes.* 2002.a ed. España: Ed McGraw-Hill / Interamericana de España; 2002.
45. Quintela. F. R, Redondo Melchor R. C. *Diccionario de Ingeniería Eléctrica* [Internet]. Universidad de Salamanca; 2006. Disponible en: <http://electricidad.usal.es/Diccionario>
46. Romero R., Zúñiga L.R. *Métodos Estadísticos en Ingeniería.* 2008.a ed. México: Ed. Limusa S.A.; 2008.
47. Schütze A, Jeong JY, Babayan SE, Park J, Selwyn GS, Hicks RF. The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *Plasma Sci IEEE Trans On.* 1998;26(6):1685–1694.
48. Shimizu S, Barczyk S, Rettberg P, Shimizu T, Klämpfl T, Zimmermann JL, et al. Cold atmospheric plasma – A new technology for spacecraft component decontamination. *Planet Space Sci.* enero de 2014;90:60-71
49. Syed Zaki Jafri. *Experimental investigation of dielectric strength of polymer films.pdf.* [Windsor, Ontario, Canada]: University of Windsor; 2001.
50. Tendero C, Tixier C, Tristant P, Desmaison J, Leprince P. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc.* enero de 2006;61(1):2-30.
51. Trek INC, *Trek 10-10B-HS Sales.pdf,* 2012.
52. Winter J, Brandenburg R, Weltmann K-D. Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions. *Plasma Sources Sci Technol.* 1 de diciembre de 2015;24(6):064001.
53. Wu Y, Liang Y, Wei K, Li W, Yao M, Zhang J, et al. MS2 Virus Inactivation by Atmospheric-Pressure Cold Plasma Using Different Gas Carriers and Power Levels. Björkroth J, editor. *Appl Environ Microbiol.* 1 de febrero de 2015;81(3):996-1002.
54. Yu QS, Huang C, Hsieh F-H, Huff H, Duan Y. Bacterial inactivation using a low-temperature atmospheric plasma brush sustained with argon gas. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* Enero de 2007;80B(1):211-9
55. Zilan Xiong, Quanjun Huang, Zhan Wang, Xinpei Lu, Yuan Pan. On the Electrical Characteristic of Atmospheric Pressure Air/He/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/Ar Plasma Needle. *IEEE Trans Plasma Sci.* julio de 2013;41(7):1746-50

56. Zhu W, Lopez JL. A dc non-thermal atmospheric-pressure plasma microjet. *Plasma Sources Sci Technol*. 1 de junio de 2012;21(3):034018
57. Zimmermann JL, Dumler K, Shimizu T, Morfill GE, Wolf A, Boxhammer V, et al. Effects of cold atmospheric plasmas on adenoviruses in solution. *J Phys Appl Phys*. 21 de diciembre de 2011;44(50):505201.

**Apéndice I:**

**Valor de las variables de  
entrada para cada uno de  
los sistemas de  
producción de plasma.**

### 1 Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

En la siguiente tabla se presentan los valores de las siguientes variables de entrada para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS:

- Id: Identificador de la prueba.
- Gros\_Di: Grosor del dieléctrico en mm.
- Voltaje: Voltaje en kV.
- Intensidad: Intensidad en mA (Aunque es una variable de entrada para el sistema se tomará en los análisis estadísticos como una variable dependiente por no poder fijarse a un valor deseado).
- Frecuencia: Frecuencia en kHz
- Hum\_Ini: Humedad inicial en %.

Id.	Gros_Di (mm)	Voltaje (kV)	Intensidad (mA)	Frecuencia (kHz)	Hum_Ini %
242	1	15.2	29.4	1	11.84
243	1	20.4	43.4	1	0.27
244	1	20.4	44.6	1	0.13
245	1	20.4	44.3	1	0.49
246	1	0	0.0	1	20.42
247	1	12.2	46.8	2	1.62
248	1	19.2	43.0	1	0.12
249	1	16.4	34.8	1	1.1
250	1	15.2	31.7	1	0.06
251	0.5	12.2	37.8	1	0.18
252	0.5	14.4	49.3	1	0.48
253	0.5	13.2	43.2	1	0.19
254	1.5	18.4	29.4	1	0.06
255	1.5	20.4	33.5	1	0.32
256	1.5	19.2	31.9	1	0.28
257	1	18.4	41.4	1	1.89
258	1	17.2	39.1	1	0.17
259	0.5	11.2	35.3	1	0.24
260	0.5	8.4	44.3	2	0.24
261	0.5	10.4	30.8	1	0.06

262	0.5	9.2	26.7	1	0.08
263	0.5	8.4	22.6	1	0.1
264	0.5	10.4	31.2	1	45
265	0.5	9.2	27.2	1	41.8
266	0.5	8.4	22.9	1	38
267	0.5	11.2	35.5	1	37
268	0.5	12.2	40.3	1	36.4
269	0.5	13.4	45.0	1	28.09
270	0.5	14.4	50.0	1	28.31
271	1	14.4	28.1	1	0.1
272	1	13.2	25.3	1	0.09
273	1	12.2	23.1	1	0.13
274	1	11.2	20.6	1	0.14
275	1	11.2	40.7	2	54.76
276	1	11.2	21.0	1	50.18
277	1	12.4	45.9	2	50.33
278	1	12.2	23.8	1	50.91
279	1	13.2	26.2	1	51.92
280	1	14.4	29.2	1	52.97
281	1	15.2	31.9	1	54.55
282	1	16	34.6	1	54.48
283	1	17.2	37.8	1	55.09
284	1	18.4	41.0	1	55.71
285	1	19.2	44.1	1	56.15
286	1	20.4	47.7	1	56.7

Apéndice I. Tabla I. Variables de entrada del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

## 2 Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4

En la siguiente tabla se presentan los valores de las siguientes variables de entrada para el sistema APPC-NTP con el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4:

- Id: Identificador de la prueba.
- Gros\_Di: Grosor del dieléctrico en mm.
- Voltaje: Voltaje en kV.
- Frecuencia: Frecuencia en kHz

- Hum\_Ini: Humedad inicial en %.

<b>Id.</b>	<b>Gros_Di (mm)</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Frecuencia (kHz)</b>	<b>Hum_Ini (%)</b>
287	0.5	11.52	5	0
288	0.5	10.24	4	0
289	0.5	7.36	3	0
290	0.5	9.28	2	0
291	0.5	7.04	1	0
292	0.5	7.04	1	51
293	0.5	9.28	2	56.8
294	0.5	7.36	3	58
295	0.5	10.24	4	58
296	0.5	11.52	5	58.7
297	0.5	14.72	6	57
298	1	13.6	5	0
299	1	16.96	6	0
300	1	11.52	4	0
301	1	10.88	5	0
302	1	11.52	6	0
303	1	14.08	7	0
304	1	14.4	8	0
305	1	18.88	9	0
306	1	11.52	4	46.65
307	1	10.88	5	53.03
308	1	11.2	6	50.34
309	1	14.08	7	50.78
310	1	16	8	45.28
311	1	18.88	9	54.14
312	1	13.76	5	55.39
313	1	17.28	6	47.82
314	1	19.84	10	0.11
315	1	18.88	7	0.11
316	1	20.16	8	0.11

Apéndice I. Tabla II. Variables de entrada del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4

### 3 Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

En la siguiente tabla se presentan los valores de las siguientes variables de entrada para el sistema APPJ-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS:

- Id: Identificador de la prueba.
- Gros\_Elec: Grosor del electrodo de potencia en mm.
- Voltaje: Voltaje en kV.
- Intensidad: Intensidad en mA (Aunque es una variable de entrada para el sistema se tomará en los análisis estadísticos como una variable dependiente por no poder fijarse a un valor deseado).
- Frecuencia: Frecuencia en kHz
- Humedad: Humedad inicial en %.
- Caudal: Caudal de aire cero en (l/min).

Id	Gros_Elec (mm)	Voltaje (kV)	Intensidad (mA)	Frecuencia (kHz)	Humedad (%)	Caudal (l/min)
1	10	8.4	5.7	1	0.13	25
2	10	8.4	10.9	2	0.13	25
3	10	8.4	15.6	3	0.13	25
4	10	8.2	20.4	4	0.13	25
5	10	8.4	24.9	5	0.13	25
6	10	8.4	29.6	6	0.13	25
7	10	8.4	34.4	7	0.13	25
8	10	8.4	38.5	8	0.13	25
9	10	9.2	6.8	1	0.13	25
10	10	9.2	13.1	2	0.13	25
11	10	9.2	18.8	3	0.13	25
12	10	9.2	24.7	4	0.13	25
13	10	9.2	30.1	5	0.13	25
14	10	9.4	35.5	6	0.13	25
15	10	9.6	41.2	7	0.13	25
16	10	10.4	8.4	1	0.13	25
17	10	10.4	15.8	2	0.13	25
18	10	10.4	23.1	3	0.13	25
19	10	10.4	29.6	4	0.13	25

Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma

20	10	10.4	35.8	5	0.13	25
21	10	11.2	9.7	1	0.13	25
22	10	11.2	18.6	2	0.13	25
23	10	11.2	26.7	3	0.13	25
24	10	11.2	34.4	4	0.13	25
25	10	12.2	10.9	1	0.13	25
26	10	12.2	20.8	2	0.13	25
27	10	12.4	30.1	3	0.13	25
28	10	12.4	38.7	4	0.13	25
29	10	13.2	12.0	1	0.13	25
30	10	13.2	23.1	2	0.13	25
31	10	13.2	33.5	3	0.13	25
32	10	13.2	43.2	4	0.13	25
33	10	14.4	13.1	1	0.13	25
34	10	14.4	25.1	2	0.13	25
35	10	14.4	36.4	3	0.13	25
36	10	15.2	14.3	1	0.13	25
37	10	15.2	27.4	2	0.13	25
38	10	15.2	39.6	3	0.13	25
39	10	16.2	15.4	1	0.13	25
40	10	16.4	29.4	2	0.13	25
41	10	16.4	42.5	3	0.13	25
42	10	17.2	16.5	1	0.13	25
43	10	17.4	31.5	2	0.13	25
44	10	18.4	17.2	1	0.13	25
45	10	18.4	33.3	2	0.13	25
46	10	19.2	18.1	1	0.13	25
47	10	19.4	35.1	2	0.13	25
48	10	20.4	19.0	1	0.13	25
49	10	20.4	37.1	2	0.13	25
50	10	8.4	34.2	7	0.13	15
51	10	8.4	38.2	8	0.13	15
52	10	9.4	35.8	6	0.13	15
53	10	9.6	40.7	7	0.13	15
54	10	10.4	29.2	4	0.13	15

Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma

55	10	8.4	29.6	6	0.13	15
56	10	9.2	29.9	5	0.13	15
57	10	10.4	35.5	5	0.13	15
58	10	11.2	26.5	3	0.13	15
59	10	11.2	34.4	4	0.13	15
60	10	12.4	30.1	3	0.13	15
61	10	12.4	38.5	4	0.13	15
62	10	13.4	33.3	3	0.13	15
63	10	13.4	43.0	4	0.13	15
64	10	14.4	36.4	3	0.13	15
65	10	15.2	39.6	3	0.13	15
66	10	16.4	42.8	3	0.13	15
67	10	17.4	31.5	2	0.13	15
68	10	18.4	33.5	2	0.13	15
69	10	19.2	35.1	2	0.13	15
70	10	20.4	37.3	2	0.13	15
71	10	8.4	29.6	6	0.13	5
72	10	8.4	34.6	7	0.13	5
73	10	8.4	38.5	8	0.13	5
74	10	9.2	30.3	5	0.13	5
75	10	9.6	36.0	6	0.13	5
76	10	10.4	29.9	4	0.13	5
77	10	10.4	36.2	5	0.13	5
78	10	11.2	27.2	3	0.13	5
79	10	11.4	34.6	4	0.13	5
80	10	12.4	30.8	3	0.13	5
81	10	12.4	39.1	4	0.13	5
82	10	13.4	33.7	3	0.13	5
83	10	13.4	43.4	4	0.13	5
84	10	14.4	36.9	3	0.13	5
85	10	15.2	39.8	3	0.13	5
86	10	16.4	43.0	3	0.13	5
87	10	17.2	31.5	2	0.13	5
88	10	18.4	33.3	2	0.13	5
89	10	19.2	35.3	2	0.13	5

Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma

90	10	20.4	37.1	2	0.13	5
91	10	8.4	38.7	8	0.13	10
92	10	9.2	35.8	6	0.13	10
93	10	10.4	35.8	5	0.13	10
94	10	11.2	34.4	4	0.13	10
95	10	12.4	38.7	4	0.13	10
96	10	13.6	43.2	4	0.13	10
97	10	14.4	36.7	3	0.13	10
98	10	15.2	39.6	3	0.13	10
99	10	16.4	43.0	3	0.13	10
100	10	17.4	31.5	2	0.13	10
101	10	18.4	33.5	2	0.13	10
102	10	19.4	35.1	2	0.13	10
103	10	20.4	37.1	2	0.13	10
104	10	8.4	29.4	6	99.7	15
105	10	8.4	33.7	7	99.7	15
106	10	8.4	37.6	8	99.7	15
107	10	9.2	28.7	5	99.7	15
108	10	9.2	35.3	6	99.7	15
109	10	10.4	36.0	5	99.7	15
110	10	11.2	26.9	3	99.7	15
111	10	11.2	34.8	4	99.7	15
112	10	12.4	30.5	3	99.7	15
113	10	12.4	39.4	4	99.7	15
114	10	13.4	33.9	3	99.7	15
115	10	13.4	43.9	4	99.7	15
116	10	14.4	37.3	3	99.7	15
117	10	15.2	40.5	3	99.7	15
118	10	16.4	43.4	3	99.7	15
119	10	17.4	31.9	2	99.7	15
120	10	18.4	33.9	2	99.7	15
121	10	19.4	35.5	2	71	15
122	10	20.4	37.3	2	67	15
123	10	8.4	38.0	8	27	15
124	10	9.6	35.8	6	27	15

Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma

125	10	10.4	36.4	5	27	15
126	10	11.2	35.1	4	36.2	15
127	10	12.4	39.4	4	37.1	15
128	10	13.4	43.7	4	33.2	15
129	10	14.4	37.3	3	31.35	15
130	10	15.2	40.3	3	29.44	15
131	10	16.4	43.4	3	32.66	15
132	10	17.4	31.9	2	29.3	15
133	10	18.4	33.9	2	28.8	15
134	10	19.4	35.5	2	29.6	15
135	10	20.4	37.3	2	29.05	15
136	10	8.4	34.4	7	34.7	15
137	10	8.4	29.6	6	33.4	15
138	10	9.2	29.6	5	33.4	15
139	10	10.4	30.1	4	30.1	15
140	10	11.2	27.2	3	28.5	15
141	10	12.4	31.0	3	27.3	15
142	10	13.4	34.2	3	27.3	15
143	10	12.4	39.4	4	76.1	15
144	10	10.4	36.2	5	72.9	15
145	9	9.4	37.1	7	0.11	15
146	9	10.4	37.1	6	0.11	15
147	9	10.4	42.3	7	0.11	15
148	9	10.4	30.8	5	0.11	15
149	9	11.2	29.4	4	0.11	15
150	9	11.4	35.8	5	0.11	15
151	9	11.4	42.3	6	0.11	15
152	9	12.4	33.5	4	0.11	15
153	9	12.4	40.5	5	0.11	15
154	9	13.4	29.0	3	0.11	15
155	9	13.6	37.8	4	0.11	15
156	9	14.4	22.4	2	0.11	15
157	9	14.4	33.0	3	0.11	15
158	9	15.2	36.0	3	0.11	15
159	9	16.4	39.6	3	0.11	15

Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma

160	9	17.4	30.1	2	0.11	15
161	9	18.4	31.9	2	0.11	15
162	9	19.4	34.2	2	0.11	15
163	9	20.4	36.4	2	0.11	15
164	9	9.6	37.6	7	0.11	25
165	9	10.4	31.0	5	0.11	25
166	9	10.4	36.9	6	0.11	25
167	9	10.4	42.5	7	0.11	25
168	9	11.2	29.2	4	0.11	25
169	9	11.2	35.5	5	0.11	25
170	9	11.6	42.5	6	0.11	25
171	9	12.4	33.3	4	0.11	25
172	9	12.4	40.7	5	0.11	25
173	9	13.6	29.0	3	0.11	25
174	9	13.4	37.6	4	0.11	25
175	9	14.4	32.8	3	0.11	25
176	9	15.2	36.2	3	0.11	25
177	9	16.4	39.6	3	0.11	25
178	9	17.4	29.6	2	0.11	25
179	9	18.4	31.9	2	0.11	25
180	9	19.2	34.2	2	0.11	25
181	9	20.4	36.2	2	0.11	25
182	9	10.4	25.6	4	0.11	25
183	9	12.4	25.8	3	0.11	25
184	9	12.4	25.8	3	0.11	15
185	9	11.2	22.6	3	0.11	15
186	9	10.4	25.3	4	0.11	15
188	9.5	9.4	37.3	7	0.11	15
189	9.5	10.4	32.1	5	0.11	15
190	9.5	11.2	32.4	4	0.11	15
191	9.5	12.4	37.3	4	0.11	15
192	9.5	13.4	41.6	4	0.11	15
193	9.5	14.4	36.2	3	0.11	15
194	9.5	15.2	39.6	3	0.11	15
195	9.5	16.4	42.5	3	0.11	15

Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma

196	9.5	17.4	31.5	2	0.11	15
197	9.5	18.4	33.7	2	0.11	15
198	9.5	19.2	35.3	2	0.11	15
199	9.5	20.4	37.3	2	0.11	15
200	8.5	9.6	37.1	7	0.11	15
202	8.5	11.2	28.1	4	0.11	15
203	8.5	12.4	31.0	4	0.11	15
204	8.5	13.4	36.4	4	0.11	15
205	8.5	14.4	32.8	3	0.11	15
206	8.5	15.2	36.9	3	0.11	15
207	8.5	16.4	40.7	3	0.11	15
208	8.5	17.4	30.5	2	0.11	15
209	8.5	18.4	33.0	2	0.11	15
210	8.5	19.2	35.1	2	0.11	15
211	8.5	20.4	37.1	2	0.11	15
212	8.5	14.4	42.3	4	0.11	15
213	10.5	9.4	41.4	6	0.11	15
214	10.5	10.4	40.7	5	0.11	15
215	10.5	11.2	38.0	4	0.11	15
216	10.5	12.4	42.1	4	0.11	15
217	10.5	13.4	36.0	3	0.11	15
218	10.5	14.4	38.9	3	0.11	15
219	10.5	15.2	41.9	3	0.11	15
220	10.5	16.4	44.8	3	0.11	15
221	10.5	17.4	32.4	2	0.11	15
222	10.5	18.4	34.4	2	0.11	15
223	10.5	19.4	36.4	2	0.11	15
224	10.5	20.4	38.5	2	0.11	15
225	10.5	16.4	30.8	2	0.11	15
226	10.5	15.2	28.7	2	0.11	15
227	10.5	12.4	32.8	3	0.11	15
228	10.5	10.4	33.3	4	0.11	15
229	10.5	9.4	41.2	6	0.11	25
230	10.5	9.2	34.8	5	0.11	25
231	10.5	9.2	34.8	5	0.11	15

Valor de las variables de entrada para cada uno de los sistemas de producción de plasma

---

232	10.5	10.4	33.3	4	0.11	25
233	10.5	11.2	38.0	4	0.11	25
234	10.5	12.4	32.8	3	0.11	25
235	10.5	13.4	36.0	3	0.11	25
236	10.5	14.4	38.9	3	0.11	25
237	10.5	15.4	28.7	2	0.11	25
238	10.5	16.4	30.8	2	0.11	25
239	10.5	17.4	32.6	2	0.11	25
240	10.5	18.4	34.4	2	0.11	25
241	10.5	19.2	36.2	2	0.11	25

**Apéndice I. Tabla III. Variables de entrada del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

# **Apéndice II:**

## **Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma.**

### 1 Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

En la siguiente tabla se presentan los valores de las siguientes variables de salida para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS:

- Id: Identificador de la prueba.
- Hum\_Fin: Humedad final (a los 120 s de irradiación) en el interior de la cámara en %.
- Temp\_mue: Temperatura de la muestra a los 120 s de irradiación en °C.
- Temp\_cam: Temperatura de la cámara a los 120 s de irradiación en °C.
- Id\_pico: Identificador del pico del espectro.
- Area\_p: Área bajo pico en cuentas.
- Altura\_p: Altura del pico en cuentas

Id	Hum_Fin (%)	Temp_mue (°C)	Temp_cam (°C)	Id_pico	Area_p (cuentas)	Altura_p (cuentas)
242	6.58	26.77	25.45	1	202.296	11.468
				2	150.347	33.962
				3	317.598	62.049
				4	441.167	71.049
				5	878.783	25.136
				6	1044.126	17.649
				7	1044.126	17.209
				8	505.360	13.102
				9	536.242	14.268
				10	227.561	12.893
				11	133.858	16.343
				12	272.092	14.783
243	6.08	29.06	25.66	1	42.586	9.254
				2	254.384	62.397
				3	770.433	199.028
				4	787.945	166.451
				5	562.910	76.775
				6	263.226	34.474
				7	156.243	14.529
				8	160.911	11.404
				9	356.265	22.066
				10	285.220	15.581

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				11	440.805	16.750
				12	60.734	20.080
244	9.52	26.17	25.36	1	27.606	9.111
				2	309.569	69.740
				3	719.799	176.059
				4	759.265	157.620
				5	461.202	70.230
				6	308.374	39.171
				7	84.361	21.264
				8	310.060	7.915
				9	475.901	16.137
				10	1030.198	14.557
				11	1030.198	13.632
				12	191.967	9.807
245	7.47	27.66	25.91	1	42.949	13.336
				2	232.145	58.527
				3	681.439	176.057
				4	739.073	152.919
				5	561.176	73.752
				6	922.260	26.609
				7	1028.370	19.054
				8	449.439	14.899
				9	411.874	14.409
				10	788.320	16.404
				11	788.320	16.015
				12	1031.941	7.274
246	3.82	26.98	25.96	1	25.717	6.559
				2	314.249	75.273
				3	667.016	186.355
				4	753.547	170.328
				5	476.479	85.982
				6	862.417	33.594
				7	219.356	19.806
				8	202.580	9.874
				9	410.705	13.893

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				10	478.300	15.798
				11	185.985	16.571
				12	303.718	14.761
247	4.25	26.02	25.87	1	195.801	8.098
				2	637.891	26.092
				3	359.361	80.188
				4	421.779	73.337
				5	297.851	29.375
				6	438.956	24.225
				7	1887.252	15.919
				8	263.636	13.048
				9	492.242	13.362
				10	919.158	6.243
				11	374.918	10.697
				12	673.120	16.432
248	6.56	26.9	26.8	1	92.828	9.927
				2	258.110	55.389
				3	686.359	176.545
				4	713.730	140.976
				5	544.188	79.468
				6	772.897	26.659
				7	150.803	19.475
				8	408.144	11.302
				9	421.276	15.335
				10	270.737	11.183
				11	293.081	20.433
				12	834.938	15.295
249	0.72	31.38	28.96	1	60.081	11.827
				2	194.419	40.250
				3	472.538	110.509
				4	459.190	88.423
				5	887.572	39.980
				6	1597.623	19.393
				7	1856.280	10.125
				8	461.354	21.607

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				9	530.778	17.080
				10	777.364	13.323
				11	777.364	18.472
				12	449.594	17.337
250	8.44	30.53	28.73	1	290.942	10.352
				2	1571.769	24.149
				3	406.151	97.190
				4	367.462	66.985
				5	944.965	39.862
				6	1571.769	21.754
				7	1806.161	12.600
				8	1148.051	9.943
				9	277.758	16.476
				10	294.104	12.656
				11	317.440	15.319
				12	860.910	15.962
251	5.67	26.53	25.47	1	152.158	11.597
				2	587.897	29.652
				3	432.806	94.290
				4	398.199	83.263
				5	302.484	42.071
				6	240.586	22.438
				7	168.037	8.816
				8	629.128	11.259
				9	268.769	16.303
				10	65.965	16.638
				11	437.930	13.924
				12	431.911	14.779
252	4.74	29.9	27.15	1	23.031	8.349
				2	251.167	51.083
				3	562.809	153.797
				4	629.713	137.088
				5	722.117	67.109
				6	723.653	27.563
				7	0.000	0.000

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				8	129.661	13.475
				9	819.475	17.313
				10	177.597	17.395
				11	1331.843	14.257
				12	282.209	12.997
253	0.00	26.94	26.04	1	68.429	9.786
				2	181.246	37.724
				3	419.356	102.404
				4	502.732	103.883
				5	778.021	48.378
				6	778.967	24.646
				7	823.186	15.941
				8	972.670	15.375
				9	679.273	19.925
				10	379.612	13.509
				11	109.161	13.625
				12	773.790	12.085
254	0.37	27.18	26.96	1	235.851	19.402
				2	352.129	16.400
				3	350.962	33.930
				4	330.013	46.280
				5	645.981	21.598
				6	65.452	17.869
				7	144.187	14.603
				8	778.286	17.964
				9	811.984	13.387
				10	811.984	19.846
				11	83.429	24.726
				12	267.903	11.676
255	5.82	29.99	28.46	1	277.208	20.201
				2	616.664	29.101
				3	367.300	72.168
				4	703.382	50.406
				5	833.647	26.222
				6	0.000	0.000

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				7	150.665	11.404
				8	190.841	11.705
				9	502.773	14.963
				10	55.936	14.937
				11	287.340	15.762
				12	727.853	19.557
256	3.35	32.12	29.5	1	67.564	11.037
				2	790.296	16.888
				3	407.226	63.859
				4	341.366	54.586
				5	0.000	0.000
				6	758.103	17.074
				7	552.644	16.222
				8	929.886	14.062
				9	503.504	20.791
				10	1159.565	16.591
				11	1161.276	12.372
				12	1159.565	17.252
257	0.00	26.83	26.14	1	110.535	6.497
				2	168.983	40.160
				3	455.154	113.409
				4	484.222	108.661
				5	645.498	46.647
				6	710.417	21.205
				7	710.417	15.520
				8	143.614	13.536
				9	272.318	15.477
				10	355.215	16.714
				11	355.215	12.769
				12	117.543	16.081
258	0.00	28.74	27.56	1	103.645	8.639
				2	187.490	30.057
				3	478.535	100.507
				4	445.092	82.044
				5	323.547	49.295

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				6	717.189	29.523
				7	741.318	18.350
				8	379.275	11.757
				9	204.718	19.521
				10	604.231	13.629
				11	604.231	15.908
				12	146.009	15.405
259	0.00	26.33	25.61	1	92.960	15.975
				2	135.072	26.727
				3	294.870	63.735
				4	273.039	51.129
				5	1030.598	30.720
				6	1030.598	20.706
				7	1312.468	11.274
				8	75.363	16.411
				9	462.559	18.786
				10	747.992	18.452
				11	747.992	20.849
				12	0.000	0.000
260	0.01	27	26.52	1	237.718	18.291
				2	418.097	16.230
				3	414.618	48.212
				4	260.926	43.683
				5	1212.363	29.170
				6	0.000	0.000
				7	1212.363	12.136
				8	135.085	15.918
				9	533.119	14.461
				10	931.051	19.002
				11	931.051	15.559
				12	931.051	14.006
261	0.00	25.77	25.33	1	33.881	9.695
				2	704.709	19.794
				3	272.522	52.396
				4	474.898	52.993

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				5	498.999	23.323
				6	0.000	0.000
				7	348.568	20.575
				8	470.375	16.657
				9	608.824	13.969
				10	248.629	21.381
				11	352.662	14.018
				12	473.163	10.539
262	0.00	25.41	25.09	1	109.388	14.445
				2	121.905	13.333
				3	425.633	31.077
				4	425.633	29.989
				5	616.914	23.243
				6	616.914	15.173
				7	616.914	13.634
				8	945.942	13.558
				9	775.439	13.139
				10	299.025	21.012
				11	319.348	16.585
				12	455.100	12.060
263	0.00	25.65	25.21	1	347.834	10.950
				2	300.856	15.108
				3	300.856	28.011
				4	154.036	26.149
				5	329.386	16.381
				6	177.894	13.978
				7	349.145	14.704
				8	423.744	15.325
				9	661.184	15.064
				10	1133.086	11.817
				11	444.358	15.596
				12	404.612	15.007
264	42.28	26	25.6	1	294.560	12.356
				2	550.685	19.794
				3	550.685	41.343

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				4	180.929	42.534
				5	147.912	21.351
				6	176.453	16.652
				7	402.648	13.930
				8	841.886	11.776
				9	465.002	26.855
				10	536.586	20.313
				11	1012.665	13.973
				12	459.177	15.524
265	41.31	26.16	25.74	1	913.735	13.085
				2	913.735	16.439
				3	717.962	34.017
				4	723.164	20.312
				5	204.128	17.511
				6	123.387	19.317
				7	699.942	18.538
				8	349.495	16.583
				9	1102.573	15.836
				10	1271.642	12.262
				11	1040.377	21.155
				12	350.151	14.087
266	37.43	26.23	25.79	1	872.756	21.107
				2	872.756	17.686
				3	149.449	23.479
				4	280.668	27.122
				5	280.668	17.022
				6	345.218	21.498
				7	82.721	19.015
				8	140.180	11.734
				9	1004.654	15.326
				10	1140.547	13.755
				11	1140.547	10.458
				12	219.361	16.820
267	37.2	26.38	25.87	1	88.677	12.997
				2	520.375	32.385

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				3	239.605	61.949
				4	601.289	58.734
				5	605.946	30.972
				6	267.167	22.139
				7	588.155	13.173
				8	626.219	14.384
				9	562.242	17.473
				10	635.063	17.384
				11	635.063	15.897
				12	520.936	22.458
268	35.31	26.63	26.01	1	53.597	11.656
				2	138.603	28.618
				3	402.237	73.795
				4	735.640	72.690
				5	1404.507	39.507
				6	1407.790	22.978
				7	158.976	16.552
				8	905.136	12.977
				9	682.286	15.586
				10	242.262	24.713
				11	237.292	24.097
				12	318.940	13.822
269	28.21	26.71	26.14	1	354.533	11.321
				2	189.519	49.496
				3	502.894	102.907
				4	417.871	91.283
				5	374.786	35.630
				6	182.890	27.741
				7	2061.060	19.993
				8	688.615	12.587
				9	507.825	13.162
				10	831.222	16.526
				11	397.547	20.343
				12	209.194	15.364
270	28.69	27.32	27.36	1	62.428	8.985

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				2	277.803	52.358
				3	511.317	133.140
				4	538.901	103.807
				5	329.793	43.289
				6	303.310	32.606
				7	158.988	17.667
				8	410.032	21.475
				9	453.673	19.704
				10	563.826	18.592
				11	477.451	22.115
				12	529.569	18.285
271	0.08	27.77	30.07	1	921.660	13.781
				2	920.133	19.262
				3	609.381	42.241
				4	359.139	43.415
				5	234.654	37.823
				6	169.341	20.234
				7	222.267	23.466
				8	1012.393	17.017
				9	428.490	18.316
				10	1555.947	15.047
				11	1124.304	19.126
				12	531.062	21.799
272	0.68	27.98	28.33	1	96.592	14.741
				2	385.511	18.187
				3	529.027	34.040
				4	529.027	40.507
				5	721.430	24.606
				6	721.430	18.736
				7	2012.885	13.745
				8	516.036	18.427
				9	401.003	23.689
				10	420.441	16.526
				11	139.624	23.239
				12	1160.514	17.169

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

273	0.00	27.98	27.49	1	361.217	21.162
				2	290.602	23.747
				3	760.556	31.772
				4	759.731	34.279
				5	798.587	15.851
				6	1054.911	16.437
				7	905.459	22.675
				8	53.884	18.498
				9	157.910	19.499
				10	159.799	15.152
				11	1138.343	23.606
				12	1138.343	26.601
274	0.02	28.13	27.56	1	215.101	18.094
				2	965.562	25.426
				3	209.593	37.665
				4	965.562	19.172
				5	1519.545	12.914
				6	1519.545	12.982
				7	409.147	14.503
				8	249.469	17.611
				9	144.417	11.802
				10	703.354	14.752
				11	703.354	12.860
				12	327.235	22.035
275	53.57	27.65	27.92	1	287.183	14.041
				2	588.803	14.919
				3	215.315	32.098
				4	783.231	47.471
				5	783.231	23.720
				6	783.231	17.494
				7	584.408	19.933
				8	440.828	20.784
				9	677.006	14.078
				10	611.218	17.360
				11	611.218	18.564

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				12	576.830	17.074
276	51.36	27.71	27.88	1	459.588	24.481
				2	705.198	19.411
				3	246.363	31.734
				4	254.032	27.739
				5	606.285	28.301
				6	606.285	19.265
				7	606.285	18.973
				8	385.413	15.883
				9	807.755	18.785
				10	393.862	18.727
				11	283.851	25.336
				12	350.646	20.906
277	49.82	27.75	29.59	1	237.177	21.857
				2	213.044	22.651
				3	296.989	68.873
				4	308.741	52.426
				5	589.987	31.270
				6	634.115	21.500
				7	634.115	17.278
				8	1635.230	15.091
				9	1635.230	15.625
				10	792.644	19.387
				11	792.644	20.497
				12	582.188	20.810
278	52.38	27.74	28.64	1	98.348	17.380
				2	653.350	18.229
				3	653.350	23.499
				4		0.000
				5	459.709	18.679
				6	244.975	14.610
				7	75.027	19.902
				8	157.408	24.305
				9	73.648	15.916
				10	335.875	23.265

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				11	572.620	15.437
				12	904.457	18.279
279	53.22	27.89	28.89	1	168.265	18.219
				2	554.142	19.523
				3	316.606	39.777
				4	259.860	32.874
				5	982.732	21.963
				6	982.732	21.544
				7	376.998	26.600
				8	193.153	22.836
				9	2574.354	15.049
				10	1979.321	19.010
				11	1979.321	22.942
				12	447.566	17.410
280	54.95	28	29.11	1	224.184	15.359
				2	201.372	20.474
				3	613.400	52.132
				4	798.399	30.279
				5	997.313	26.122
				6	767.027	21.564
				7	767.027	23.574
				8	2413.444	15.801
				9	1024.823	13.832
				10	111.659	22.587
				11	516.489	17.931
				12	509.635	27.559
281	53.93	27.96	29.55	1	208.691	14.063
				2	350.903	33.325
				3	291.930	56.945
				4	334.809	65.012
				5	306.625	34.539
				6	234.206	26.478
				7	0.000	0.000
				8	914.821	21.790
				9	1174.676	18.497

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				10	129.544	20.536
				11	304.049	25.398
				12	343.403	17.907
282	54.64	28.13	29.75	1	782.189	15.682
				2	290.543	27.489
				3	303.215	70.941
				4	376.836	68.391
				5	738.210	26.383
				6	1553.348	17.942
				7	1553.348	18.411
				8	313.591	13.646
				9	618.131	22.108
				10	80.624	13.030
				11	1533.848	17.785
				12	686.300	27.023
283	57.35	28.45	30.22	1	276.570	23.318
				2	430.112	35.499
				3	387.326	88.723
				4	415.818	89.444
				5	415.966	29.465
				6	366.312	19.789
				7	366.312	18.252
				8	234.263	10.914
				9	356.840	17.327
				10	521.065	14.748
				11	495.977	21.698
				12	1092.929	19.377
284	54.5	28.72	30.85	1	431.521	20.461
				2	267.766	33.303
				3	399.636	93.883
				4	482.830	75.136
				5	292.360	40.277
				6	274.251	18.153
				7	175.236	18.595
				8	162.973	20.478

				9	539.994	17.358
				10	508.626	11.298
				11	508.626	17.238
				12	125.557	12.090
285	58.86	29.03	31.7	1	557.048	8.646
				2	349.160	42.117
				3	491.720	121.898
				4	557.800	88.583
				5	707.751	57.682
				6	2179.002	25.950
				7	2179.002	18.475
				8	249.758	18.966
				9	735.457	19.597
				10	435.911	21.418
				11	499.100	17.219
				12	204.171	13.561
286	56.76	29.34	31.84	1	466.264	9.211
				2	243.859	50.758
				3	595.094	116.298
				4	570.387	118.083
				5	661.554	61.411
				6	1921.260	24.736
				7	2196.892	23.011
				8	297.084	17.833
				9	569.068	27.653
				10	366.421	15.734
				11	1237.045	22.548
				12	1237.045	19.246

Apéndice II. Tabla I: Variables de salida del sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

## 2 Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4

En la siguiente tabla se presentan los valores de las siguientes variables de salida para el sistema APPC-NTP con el amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4:

- Id: Identificador de la prueba.
- Hum\_Fin: Humedad final (a los 120 s de irradiación) en el interior de la cámara en %.
- Temp\_mue: Temperatura de la muestra a los 120 s de irradiación en °C.
- Temp\_cam: Temperatura de la cámara a los 120 s de irradiación en °C.
- Id\_pico: Identificador del pico del espectro.
- Area\_p: Área bajo pico en cuentas.
- Altura\_p: Altura del pico en cuentas

Id	Hum_Fin (%)	Temp_mue (°C)	Temp_cam (°C)	Id_pico	Area_p (cuentas)	Altura_p (cuentas)
287	4.93	27.02	28.58	1	18.68	5.81
				2	665.72	167.21
				3	1842.72	497.00
				4	1879.59	390.53
				5	1199.13	192.47
				6	641.43	82.98
				7	273.72	27.39
				8	142.51	15.14
				9	458.31	22.65
				10	372.19	20.73
				11	372.19	14.63
288	0.11	27.55	27.92	1	90.94	10.93
				2	393.01	84.56
				3	900.24	237.59
				4	956.75	200.50
				5	627.05	103.27
				6	384.49	41.90
				7	1318.39	25.81
				8	387.90	15.21

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				9	253.11	23.41
				10	865.10	28.96
				11	1015.65	19.14
289	0	27.83	28.67	1	303.14	18.78
				2	303.14	13.86
				3	292.73	37.09
				4	243.53	42.62
				5	1839.01	14.81
				6	380.44	19.21
				7	827.92	19.45
				8	291.69	16.83
				9	1632.86	18.34
				10	1632.86	14.73
				11	204.93	13.56
290	0.47	28.4	31.84	1	155.75	16.99
				2	289.88	39.12
				3	526.43	112.65
				4	1025.16	78.95
				5	551.29	51.13
				6	2008.70	17.50
				7	118.58	18.02
				8	102.32	12.96
				9	978.72	20.51
				10	371.36	20.37
				11	2209.90	10.35
291	0.2	28.57	35.48	1	408.63	15.02
				2	408.63	21.61
				3	329.04	46.25
				4	217.97	32.10
				5	842.50	22.05
				6	1063.92	19.16
				7	1063.92	21.20
				8	233.12	15.45
				9	1255.82	17.31
				10	83.58	14.99

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				11	407.77	17.58
292	54.03	28.68	34.92	1	1632.07	19.44
				2	1632.07	18.77
				3	328.47	36.77
				4	797.74	21.27
				5	582.37	24.24
				6	582.37	21.70
				7	1632.07	19.49
				8	679.78	22.27
				9	820.27	27.39
				10	1357.50	10.57
293	56.65	28.64	36.98	1	330.11	20.32
				2	259.44	31.53
				3	373.29	70.26
				4	1058.43	68.39
				5	1272.82	35.60
				6	1660.55	15.51
				7	1660.55	14.15
				8	82.08	15.91
				9	935.43	14.34
				10	407.04	21.21
294	58.4	28.68	35.12	1	418.88	17.60
				2	295.36	16.34
				3	1485.97	26.34
				4	1485.97	31.13
				5	1485.97	27.13
				6	1532.20	23.72
				7	1532.20	17.38
				8	443.02	13.88
				9	896.33	14.70
				10	92.86	15.21
295	58.82	28.63	34.9	1	560.82	15.15

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				2	490.54	90.82
				3	832.82	204.04
				4	825.25	187.08
				5	588.87	81.73
				6	157.48	31.72
				7	281.45	18.69
				8	560.54	16.00
				9	415.61	18.08
				10	1419.50	16.54
				11	773.82	24.85
296	59.49	28.79	35.2	1	10.17	3.23
				2	601.69	149.63
				3	1469.84	400.62
				4	1557.57	331.76
				5	1014.39	157.10
				6	455.80	68.57
				7	154.32	24.73
				8	277.61	16.58
				9	453.15	19.82
				10	151.20	25.22
				11	1091.71	27.44
297	56.72	29.68	38.44	1	7.46	2.43
				2	1453.26	343.49
				3	3603.53	947.34
				4	3900.62	799.41
				5	2304.61	386.55
				6	1216.36	144.85
				7	207.36	62.26
				8	169.49	19.20
				9	746.19	31.41
				10	855.12	27.73
				11	855.12	28.78
298	3.46	30.89	28.97	1	36.77	7.03
				2	547.58	121.45
				3	1282.46	327.30

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				4	1364.14	275.03
				5	837.82	124.12
				6	393.27	48.22
				7	762.43	23.12
				8	475.54	23.61
				9	238.94	17.46
				10	1181.46	23.94
				11	1181.46	25.31
299	6.83	31.5	28.67	1	20.15	6.74
				2	1054.60	264.37
				3	2612.49	709.89
				4	2945.01	613.96
				5	1811.42	294.43
				6	936.99	109.47
				7	203.89	37.94
				8	306.29	19.25
				9	638.85	25.74
				10	308.70	53.74
				11	495.72	34.73
300	0.2	29.36	29.67	1	86.09	12.91
				2	308.94	65.89
				3	612.20	157.08
				4	744.58	139.40
				5	446.79	64.68
				6	329.59	34.76
				7	703.23	22.05
				8	456.74	17.98
				9	447.60	19.01
				10	1642.61	15.86
				11	1641.64	24.89
301	1.82	29.07	28.68	1	77.49	12.83
				2	340.33	71.38
				3	643.78	148.83
				4	643.91	113.28
				5	1033.33	53.11

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				6	1076.90	21.05
				7	1033.33	29.32
				8	514.34	16.95
				9	769.15	25.56
				10	607.72	16.59
				11	607.72	16.21
302	0	29.08	29.53	1	98.12	13.20
				2	347.30	80.96
				3	887.09	242.20
				4	916.92	184.92
				5	1577.12	93.53
				6	2014.34	41.82
				7	197.07	25.50
				8	373.64	19.43
				9	1059.04	24.03
				10	824.10	19.79
				11	639.85	23.47
303	0	29.55	31.24	1	41.04	5.86
				2	731.70	178.49
				3	1962.87	523.75
				4	2107.82	450.03
				5	1331.72	209.65
				6	764.07	89.28
				7	219.07	47.20
				8	651.30	20.04
				9	470.56	24.97
				10	403.76	24.37
				11	261.07	30.15
304	2.57	30.42	33.41	1	15.26	5.09
				2	788.88	210.55
				3	2137.77	575.75
				4	2253.93	482.48
				5	1464.22	234.36
				6	854.94	85.21
				7	196.25	55.61

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				8	275.94	15.43
				9	713.08	32.32
				10	311.15	15.22
				11	356.43	29.21
305	4	31.91	35.54	1	20.75	6.91
				2	1280.04	326.62
				3	3587.15	930.33
				4	3767.37	800.17
				5	2296.53	393.82
				6	1223.17	140.03
				7	170.57	51.72
				8	239.45	17.76
				9	767.54	36.58
				10	249.22	32.43
				11	450.72	37.16
306	52.88	27.66	27.87	1	3098.41	9.74
				2	260.05	52.06
				3	639.30	145.92
				4	694.23	125.27
				5	404.39	61.70
				6	695.22	25.41
				7	103.21	16.68
				8	2180.54	20.77
				9	2180.54	21.83
				10	2182.90	13.59
				11	2182.90	13.98
307	55.63	27.76	28.51	1	73.98	10.29
				2	212.64	48.21
				3	529.33	101.29
				4	437.82	91.82
				5	498.09	63.75
				6	321.07	27.55
				7	283.29	18.77
				8	974.13	19.63
				9	617.32	23.75

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

				10	585.34	11.81
				11	583.80	17.53
308	49.87	27.86	28.91	1	105.09	15.73
				2	316.58	77.54
				3	740.55	190.31
				4	855.31	175.04
				5	491.09	80.05
				6	580.71	40.17
				7	728.62	13.15
				8	152.07	16.91
				9	688.28	18.28
				10	817.13	17.47
				11	343.26	21.61
309	49.59	28.33	30.87	1	60.02	17.52
				2	733.47	177.28
				3	2022.39	543.13
				4	2132.62	450.72
				5	1357.45	214.10
				6	786.60	81.07
				7	134.50	39.63
				8	223.94	16.12
				9	899.09	19.05
				10	418.93	28.39
				11	2568.28	17.03
310	43.89	29.29	33.85	1	56.61	12.98
				2	780.01	194.72
				3	2133.40	562.18
				4	2315.24	488.00
				5	1322.18	220.64
				6	759.54	80.61
				7	128.98	39.80
				8	153.09	10.00
				9	526.36	36.69
				10	748.12	31.53
				11	912.76	14.56

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

311	50.34	30	34.75	1	9.81	3.51
				2	1239.93	299.18
				3	3235.22	870.75
				4	3561.19	749.69
				5	2187.93	344.49
				6	1155.81	126.73
				7	239.74	65.65
				8	51.43	16.97
				9	583.35	27.58
				10	773.81	22.49
				11	457.25	25.63
312	53.15	30.51	32.75	1	26.30	6.15
				2	568.53	132.74
				3	1401.38	350.89
				4	1488.30	309.04
				5	915.70	148.58
				6	526.23	55.71
				7	215.05	37.72
				8	106.82	13.67
				9	711.97	15.25
				10	422.61	13.07
				11	422.61	15.52
313	44.72	31.08	35.09	1	40.48	13.41
				2	1107.08	266.60
				3	2762.17	746.11
				4	3087.43	647.71
				5	1888.67	307.92
				6	1075.77	117.62
				7	180.43	51.99
				8	151.24	21.21
				9	538.59	28.80
				10	107.55	14.38
				11	252.11	28.47
314	5.19	29.38	33.99	1	12.50	4.48
				2	660.65	160.21

				3	1850.24	502.23
				4	2067.24	444.59
				5	1378.14	228.35
				6	744.14	85.01
				7	275.52	42.62
				8	195.63	23.38
				9	207.89	29.02
				10	804.16	24.64
				11	804.16	23.18
315	3.78	30.76	34.47	1	73.58	8.21
				2	471.87	121.53
				3	1409.94	374.82
				4	1594.67	331.35
				5	960.70	158.35
				6	492.18	70.97
				7	113.37	32.50
				8	266.85	10.98
				9	691.55	24.83
				10	431.05	13.41
				11	431.05	18.97
316	5.42	31.75	35.92	1	12.92	4.08
				2	585.05	148.50
				3	1642.04	425.56
				4	1854.85	387.02
				5	1185.11	184.42
				6	679.43	80.16
				7	158.36	35.57
				8	281.41	14.32
				9	497.75	21.11
				10	428.53	19.65
				11	428.53	19.38

Apéndice II. Tabla II Variables de salida del sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls

### 3 Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

En la siguiente tabla se presentan los valores de las siguientes variables de salida para el sistema APPJ-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS:

- Id: Identificador de la prueba.
- Temp\_mue: Temperatura de la muestra a los 120 s de irradiación en °C.
- Id\_pico: Identificador del pico del espectro.
- Area\_p: Área bajo pico en cuentas.
- Altura\_p: Altura del pico en cuentas.

Id	Temp_mue (°C)	Id_pico	Area_p (cuentas)	Altura_p (cuentas)
1	27.72	1	149.67	11.69
		2	410.02	85.11
		3	865.43	219.65
		4	860.87	170.44
		5	456.75	71.82
		6	238.38	26.21
		7	194.25	18.18
		8	381.16	16.27
		9	705.57	14.91
		10	754.57	18.06
		11	754.57	17.07
2	27.81	1	76.44	22.95
		2	729.97	171.94
		3	1719.92	445.31
		4	1537.94	326.78
		5	880.27	143.15
		6	377.75	50.92
		7	39.65	13.22
		8	129.18	15.10
		9	485.10	21.95
		10	1136.89	17.73
		11	1136.89	19.47
3	27.83	1	53.14	17.35
		2	1087.02	275.28
		3	2599.40	678.03

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		4	2411.35	517.14
		5	1269.38	225.03
		6	497.92	66.57
		7	145.66	25.37
		8	134.26	23.28
		9	235.47	20.98
		10	438.66	18.48
		11	586.10	23.36
4	28.13	1	26.13	8.10
		2	1393.58	345.02
		3	3417.36	913.32
		4	3321.91	697.00
		5	1701.71	291.76
		6	754.09	88.83
		7	89.87	21.87
		8	50.65	16.57
		9	392.38	29.01
		10	468.05	25.27
		11	465.74	32.68
5	28.34	1	43.38	13.83
		2	1830.53	453.24
		3	4273.12	1154.29
		4	4176.11	893.53
		5	2188.68	371.94
		6	912.56	121.63
		7	110.47	35.05
		8	138.98	11.77
		9	241.65	34.60
		10	664.20	38.89
		11	693.67	28.85
6	28.69	1	53.27	16.53
		2	2357.97	588.53
		3	5438.70	1472.42
		4	5354.34	1131.80
		5	2780.49	486.06

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		6	1103.07	148.57
		7	142.70	45.25
		8	35.95	5.83
		9	458.04	39.50
		10	862.44	21.02
		11	725.96	40.83
7	28.78	1	58.27	18.09
		2	2831.43	706.88
		3	6671.06	1785.02
		4	6502.09	1370.11
		5	3333.78	585.73
		6	1313.43	175.12
		7	156.63	50.42
		8	106.26	11.07
		9	321.97	46.31
		10	423.37	43.68
		11	447.76	44.55
8	28.93	1	43.33	13.48
		2	3283.26	817.75
		3	7701.15	2074.40
		4	7508.09	1592.67
		5	3973.43	670.67
		6	1522.34	210.31
		7	182.74	59.24
		8	57.60	17.48
		9	841.99	64.78
		10	258.52	42.04
		11	437.38	45.12
9	28.53	1	45.59	8.96
		2	826.46	199.45
		3	1871.61	489.55
		4	1768.35	373.18
		5	928.24	154.38
		6	1395.05	42.76
		7	79.69	14.36

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		8	139.36	11.19
		9	267.97	32.45
		10	420.02	23.26
		11	420.02	21.31
10	28.72	1	58.20	18.06
		2	1523.71	382.40
		3	3575.07	958.14
		4	3487.07	761.20
		5	1862.53	315.91
		6	666.40	90.27
		7	46.27	14.70
		8	129.92	12.61
		9	559.61	38.17
		10	648.71	28.48
		11	648.71	26.43
11	28.87	1	46.59	13.13
		2	2382.12	591.51
		3	5546.89	1500.27
		4	5477.04	1162.53
		5	2856.89	487.77
		6	1056.39	143.36
		7	136.80	43.18
		8	66.27	22.31
		9	607.62	34.37
		10	267.83	27.70
		11	401.87	49.40
12	29.19	1	55.27	17.37
		2	3209.72	798.48
		3	7426.71	2016.29
		4	7177.48	1537.25
		5	3715.98	637.64
		6	1476.06	195.26
		7	225.32	71.07
		8	23.17	7.25
		9	381.79	54.12

		10	978.15	34.01
		11	977.02	54.62
13	29.49	1	80.10	25.12
		2	4010.56	999.93
		3	9536.25	2562.64
		4	9235.57	1952.71
		5	4784.32	829.70
		6	1840.93	255.99
		7	195.46	61.29
		8	126.52	22.65
		9	478.99	73.07
		10	1191.26	50.98
		11	1187.31	83.18
14	29.73	1	145.56	45.95
		2	5059.50	1262.23
		3	11936.57	3237.94
		4	11745.64	2500.15
		5	6106.41	1050.05
		6	2400.26	339.86
		7	281.46	89.26
		8	53.26	13.59
		9	580.22	82.81
		10	515.91	66.80
		11	864.27	91.83
15	30.1	1	163.63	51.29
		2	6210.57	1544.42
		3	14722.14	3963.53
		4	14372.89	3037.71
		5	7484.61	1293.04
		6	2815.48	385.61
		7	375.18	118.14
		8	39.76	12.48
		9	716.04	107.13
		10	726.66	86.66
		11	802.56	92.22

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

16	29.13	1	47.53	14.90
		2	1317.18	328.54
		3	3184.07	862.91
		4	3156.46	682.77
		5	1562.87	276.68
		6	602.92	81.34
		7	102.32	28.57
		8	163.16	7.53
		9	463.86	25.75
		10	625.83	29.91
		11	622.48	37.52
17	29.36	1	62.10	20.11
		2	2783.81	693.17
		3	6499.38	1746.45
		4	6243.13	1343.26
		5	3301.06	562.35
		6	1220.35	176.97
		7	144.42	45.47
		8	54.01	15.51
		9	357.85	52.47
		10	419.21	48.87
		11	434.38	46.57
18	29.6	1	81.43	25.85
		2	4142.97	1038.63
		3	9862.17	2672.96
		4	9657.52	2064.41
		5	4930.93	856.77
		6	1875.76	271.61
		7	186.12	58.78
		8	53.81	12.39
		9	473.45	81.96
		10	1278.15	69.09
		11	1265.21	76.53
19	29.88	1	118.47	37.11
		2	5684.48	1410.48

		3	13191.12	3573.90		
		4	12891.33	2755.06		
		5	6730.77	1154.26		
		6	2485.35	362.23		
		7	316.65	100.82		
		8	24.52	8.25		
		9	606.83	108.21		
		10	1596.86	67.08		
		11	945.68	89.24		
		20	30.42	1	125.25	39.47
				2	7130.17	1777.45
3	16993.09			4570.54		
4	16528.26			3515.48		
5	8615.08			1477.44		
6	3287.25			462.87		
7	412.77			131.13		
8	33.86			9.02		
9	760.54			121.43		
10	1955.45			92.57		
11	1942.82			118.74		
21	29.53	1	37.28	11.65		
		2	2047.23	498.46		
		3	4855.37	1305.71		
		4	4645.03	999.23		
		5	2358.59	407.63		
		6	938.21	125.06		
		7	158.12	43.78		
		8	57.18	17.39		
		9	396.74	39.82		
		10	516.02	31.43		
		11	520.99	35.59		
22	29.74	1	78.47	24.37		
		2	4094.79	1019.14		
		3	9792.54	2652.16		
		4	9529.25	2045.04		

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		5	4965.27	858.06
		6	1923.71	269.01
		7	278.52	88.50
		8	50.18	11.64
		9	786.86	73.07
		10	510.72	57.66
		11	571.64	75.12
23	30.01	1	140.34	44.03
		2	6362.54	1585.09
		3	15020.22	4040.43
		4	14535.31	3095.11
		5	7515.82	1295.33
		6	2857.45	411.91
		7	343.84	109.24
		8	39.83	13.50
		9	665.82	102.23
		10	784.85	105.45
		11	1786.50	98.40
24	30.49	1	178.72	56.03
		2	8574.67	2134.51
		3	20229.55	5480.05
		4	19872.42	4251.29
		5	10287.60	1781.36
		6	3770.84	542.40
		7	451.32	143.02
		8	33.36	10.88
		9	985.00	145.15
		10	873.03	107.00
		11	1348.43	139.06
25	29.76	1	50.94	16.23
		2	2590.25	647.49
		3	6038.37	1637.24
		4	5945.44	1275.23
		5	3077.92	529.69
		6	1142.36	156.34

		7	139.83	45.37
		8	38.54	10.42
		9	340.57	48.47
		10	1010.93	46.10
		11	1010.93	45.89
26	29.74	1	112.44	35.70
		2	5271.35	1320.70
		3	12435.26	3376.82
		4	12173.65	2603.29
		5	6281.37	1082.06
		6	2470.64	352.26
		7	295.99	93.83
		8	40.89	13.05
		9	525.76	85.33
		10	695.63	79.00
		11	778.96	82.90
27	30.18	1	178.90	56.11
		2	8037.68	2005.73
		3	19118.07	5146.66
		4	18622.41	3966.07
		5	9687.00	1676.14
		6	3705.57	523.65
		7	429.58	135.77
		8	64.48	21.44
		9	874.82	143.80
		10	911.02	113.10
		11	1247.60	131.80
28	31.08	1	209.13	66.08
		2	10980.13	2736.44
		3	26132.60	7024.55
		4	25547.67	5448.31
		5	13083.36	2253.64
		6	4881.44	707.56
		7	607.34	191.94
		8	47.89	15.73

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		9	1239.32	188.11
		10	1180.40	140.62
		11	1734.85	185.59
29	29.77	1	61.70	19.99
		2	3074.21	772.33
		3	7305.85	1975.92
		4	7126.50	1518.47
		5	3695.51	645.43
		6	1394.12	197.33
		7	167.81	53.24
		8	44.07	11.50
		9	353.44	53.65
		10	831.79	40.95
		11	831.79	47.79
30	30.04	1	142.31	44.87
		2	6360.82	1590.70
		3	15192.03	4080.26
		4	14703.24	3124.57
		5	7645.91	1299.96
		6	2849.57	396.46
		7	364.58	116.17
		8	48.34	9.87
		9	734.58	107.60
		10	1791.94	99.17
		11	1791.94	98.35
31	30.53	1	190.73	60.26
		2	9763.39	2441.51
		3	23128.26	6256.45
		4	22712.29	4833.54
		5	11622.24	2014.86
		6	4379.62	633.09
		7	516.15	163.84
		8	31.42	9.24
		9	1083.72	170.69
		10	1143.40	138.26

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		11	1501.08	163.71
32	31.16	1	260.11	81.97
		2	13460.84	3347.16
		3	31561.11	8540.93
		4	30963.85	6589.35
		5	15958.66	2765.83
		6	5902.33	842.65
		7	698.78	220.51
		8	55.22	17.28
		9	1448.39	218.22
		10	1538.26	177.36
				11
33	29.88	1	81.94	25.52
		2	3630.29	896.78
		3	8621.84	2320.93
		4	8440.08	1798.33
		5	4268.53	726.09
		6	1622.21	233.69
		7	245.02	77.71
		8	108.20	17.01
		9	863.72	65.07
		10	544.59	60.30
				11
34	30.29	1	163.98	51.50
		2	7562.57	1871.62
		3	17813.35	4822.69
		4	17434.03	3695.04
		5	8964.33	1541.74
		6	3337.30	484.29
		7	424.44	133.77
		8	72.73	22.25
		9	839.49	131.90
		10	819.47	97.41
				11
35	30.52	1	277.76	86.91

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		2	11623.07	2901.23
		3	27768.52	7465.46
		4	26984.96	5737.59
		5	13907.52	2394.75
		6	5126.33	744.97
		7	652.35	206.86
		8	61.25	18.04
		9	1266.58	193.06
		10	1350.54	156.71
		11	1714.05	181.77
		36	26.88	1
2	4073.82			1023.36
3	9652.64			2621.85
4	9447.80			2008.93
5	4870.24			842.18
6	1845.19			264.58
7	217.82			68.78
8	43.45			10.16
9	749.54			69.43
10	1227.55			68.47
11	1228.97			63.72
37	27.93	1	184.50	58.04
		2	8517.48	2122.45
		3	20061.07	5442.22
		4	19576.66	4156.58
		5	10136.79	1756.98
		6	3750.59	541.18
		7	436.98	138.28
		8	54.30	17.67
		9	922.99	143.16
		10	2418.71	123.88
		11	2418.71	141.90
38	28.6	1	277.11	86.69
		2	13247.26	3294.86
		3	31136.74	8433.48

		4	30300.26	6442.47
		5	15669.78	2712.27
		6	5831.21	840.66
		7	681.06	215.68
		8	47.34	14.53
		9	1445.26	227.25
		10	3549.70	169.15
		11	2035.24	216.73
39	27.76	1	105.34	33.34
		2	4708.92	1179.00
		3	11183.75	3035.10
		4	10815.25	2310.76
		5	5677.86	975.79
		6	2158.09	295.49
		7	238.66	75.76
		8	51.72	17.00
		9	527.25	85.89
		10	550.10	68.74
		11	721.58	78.39
40	28.34	1	220.57	69.41
		2	9908.75	2451.37
		3	23157.34	6277.87
		4	22698.87	4822.64
		5	11664.42	2008.44
		6	4396.57	625.38
		7	489.51	154.31
		8	75.56	21.70
		9	1044.59	158.65
		10	2655.09	133.34
		11	2655.09	151.73
41	29.34	1	339.96	106.69
		2	15251.25	3792.50
		3	36063.74	9761.34
		4	35122.36	7478.93
		5	18146.19	3137.76

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		6	6756.41	961.38
		7	813.81	258.03
		8	34.76	8.98
		9	1737.00	259.62
		10	1779.59	211.80
		11	2354.07	251.97
42	28.38	1	78.24	24.76
		2	5399.41	1349.88
		3	12759.17	3454.98
		4	12474.84	2656.55
		5	6423.29	1107.85
		6	2394.29	331.25
		7	270.67	85.19
		8	46.47	14.80
		9	635.38	102.22
		10	1560.26	82.15
		11	1560.26	88.41
43	28.69	1	236.93	74.91
		2	11182.11	2787.32
		3	26420.08	7158.32
		4	25781.59	5487.06
		5	13359.35	2311.03
		6	4940.19	710.56
		7	631.34	200.44
		8	87.93	29.53
		9	1233.80	196.45
		10	1293.88	150.63
		11	1682.92	184.57
44	28.4	1	85.57	27.09
		2	6052.45	1504.94
		3	14316.07	3876.13
		4	14007.11	2968.88
		5	7124.30	1234.54
		6	2732.96	383.92
		7	317.37	100.52

		8	34.62	11.36
		9	665.21	101.42
		10	1788.42	88.33
		11	1012.03	100.84
45	29.14	1	269.29	84.70
		2	12589.79	3136.59
		3	29786.08	8077.82
		4	29061.39	6193.47
		5	15098.26	2608.88
		6	5666.43	805.86
		7	676.35	215.03
		8	53.68	17.79
		9	1406.80	223.80
		10	3352.85	165.35
		11	1955.09	200.05
46	28.73	1	142.97	44.78
		2	6752.69	1692.85
		3	15895.45	4314.69
		4	15564.73	3314.32
		5	8026.50	1376.82
		6	2991.35	430.09
		7	305.49	96.99
		8	60.02	19.57
		9	765.14	129.56
		10	789.63	95.70
		11	1065.17	118.17
47	29.58	1	274.91	86.57
		2	14072.41	3506.33
		3	33256.75	9001.34
		4	32453.27	6896.32
		5	16752.56	2904.30
		6	6208.05	898.09
		7	711.49	224.91
		8	65.41	22.16
		9	1575.64	249.71

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		10	1691.15	195.52
		11	2191.29	232.83
48	28.69	1	127.34	39.82
		2	7462.92	1863.86
		3	17637.48	4783.29
		4	17272.75	3672.72
		5	8798.45	1546.07
		6	3287.46	479.06
		7	393.19	124.38
		8	32.89	9.67
		9	790.83	126.72
		10	930.27	109.97
		11	1172.72	125.01
49	29.71	1	332.60	104.20
		2	15530.59	3873.38
		3	36896.47	10001.71
		4	35973.33	7652.97
		5	18618.76	3209.70
		6	6977.86	998.34
		7	820.57	259.61
		8	53.19	17.86
		9	1687.30	268.58
		10	1898.76	209.52
		11	2392.51	257.84
50	27.74	1	25.04	7.67
		2	2470.24	610.89
		3	5799.92	1552.06
		4	5654.10	1201.63
		5	2916.86	502.48
		6	1202.66	157.83
		7	154.32	49.20
		8	65.76	7.62
		9	631.12	37.38
		10	540.51	46.64
		11	401.19	47.59

51	27.94	1	81.68	25.88
		2	3057.22	760.50
		3	7151.77	1921.40
		4	6945.26	1474.34
		5	3614.38	621.39
		6	1358.86	190.72
		7	193.93	61.25
		8	117.83	9.92
		9	257.64	38.28
		10	837.69	53.63
		11	839.87	49.99
52	28.7	1	70.95	22.83
		2	4974.93	1237.89
		3	11664.46	3164.10
		4	11458.56	2437.81
		5	5923.94	1042.51
		6	2275.95	307.32
		7	285.18	89.95
		8	24.35	7.81
		9	539.58	82.51
		10	1406.23	60.33
		11	1400.57	80.74
53	29.07	1	133.38	41.50
		2	5897.31	1464.93
		3	13940.11	3770.36
		4	13681.40	2910.23
		5	7074.28	1213.42
		6	2695.30	379.01
		7	305.55	96.41
		8	28.40	9.51
		9	668.04	96.70
		10	623.28	66.77
		11	851.63	85.73
54	28.76	1	148.00	46.43
		2	5405.40	1347.62

		3	12599.29	3420.48		
		4	12354.69	2632.62		
		5	6392.88	1100.11		
		6	2351.49	335.69		
		7	306.75	96.89		
		8	56.38	17.31		
		9	805.09	82.08		
		10	1582.28	74.17		
		11	1582.28	87.47		
		55	27.74	1	50.69	16.40
				2	2079.63	509.12
3	4898.78			1322.61		
4	4792.49			1029.26		
5	2543.19			437.27		
6	448.22			142.06		
7	114.48			34.04		
8	85.66			11.89		
9	215.16			34.93		
10	803.57			37.18		
11	803.57			44.58		
56	28.37	1	68.21	21.57		
		2	3711.52	918.43		
		3	8697.86	2357.91		
		4	8553.02	1824.04		
		5	4409.82	767.21		
		6	1671.09	234.54		
		7	199.90	64.40		
		8	100.66	13.69		
		9	409.19	64.38		
		10	989.92	44.71		
		11	989.92	61.46		
57	29.27	1	151.17	47.65		
		2	6806.90	1692.79		
		3	16046.51	4352.46		
		4	15750.05	3351.20		

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		5	8038.70	1403.81
		6	3025.78	439.13
		7	375.85	119.15
		8	32.02	10.87
		9	789.57	121.42
		10	718.34	94.42
		11	1065.64	114.76
58	29.27	1	164.70	52.01
		2	6122.95	1520.23
		3	14409.13	3904.14
		4	14131.26	3021.31
		5	7326.56	1266.73
		6	2766.55	404.79
		7	310.86	100.71
		8	51.15	13.82
		9	699.62	107.69
		10	721.75	85.33
		11	961.01	107.29
59	29.74	1	189.35	60.05
		2	8325.60	2077.91
		3	19733.22	5345.16
		4	19225.88	4099.91
		5	9905.52	1716.67
		6	3752.53	539.67
		7	497.53	158.16
		8	33.17	10.92
		9	937.16	147.10
		10	909.62	106.28
		11	1320.74	140.86
60	29.71	1	146.77	46.62
		2	7948.08	1978.13
		3	18701.78	5071.08
		4	18287.65	3901.80
		5	9410.50	1639.97
		6	3550.08	508.39

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		7	426.19	134.89
		8	55.10	17.02
		9	918.95	146.20
		10	974.22	109.21
		11	1159.14	129.58
61	29.89	1	211.40	66.96
		2	10752.31	2692.75
		3	25478.69	6898.22
		4	25003.01	5330.71
		5	12897.88	2230.81
		6	4827.37	698.52
		7	558.02	176.86
		8	74.92	24.91
		9	1122.23	183.32
		10	1257.50	148.81
		11	1746.49	176.53
62	30.19	1	192.50	60.28
		2	9625.58	2399.62
		3	22844.84	6198.22
		4	22372.15	4754.89
		5	11474.59	2004.77
		6	4198.55	617.42
		7	530.33	168.59
		8	47.44	15.70
		9	985.60	164.45
		10	1115.60	147.05
		11	1428.64	150.62
63	30.88	1	272.98	85.60
		2	13238.62	3298.78
		3	31501.76	8539.48
		4	30809.09	6557.96
		5	15872.49	2740.06
		6	5928.84	858.28
		7	729.99	231.60
		8	39.44	13.16

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		9	1466.66	224.01
		10	1516.89	180.04
		11	1992.28	201.94
64	31.09	1	234.24	73.45
		2	11563.46	2872.42
		3	27372.57	7416.94
		4	26780.83	5705.31
		5	13900.84	2382.03
		6	5273.42	748.83
		7	625.02	198.47
		8	52.09	17.02
		9	1293.43	197.00
		10	1276.51	151.39
		11	1945.17	206.99
65	31.4	1	281.24	89.03
		2	13508.18	3358.94
		3	31938.72	8645.66
		4	31164.98	6627.57
		5	16026.13	2782.04
		6	5978.54	866.61
		7	715.59	226.87
		8	72.20	23.52
		9	1521.91	233.11
		10	1533.53	176.59
		11	2013.12	217.37
66	32.06	1	298.50	94.31
		2	15664.82	3900.47
		3	37182.12	10070.80
		4	36306.58	7707.59
		5	18681.03	3246.99
		6	6990.28	1005.51
		7	813.15	258.22
		8	65.14	21.19
		9	1738.42	254.90
		10	1756.61	197.89

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		11	2343.11	246.74
67	31.3	1	207.05	65.65
		2	11485.13	2857.53
		3	27245.15	7332.47
		4	26398.17	5638.03
		5	13590.06	2375.71
		6	5098.95	722.00
		7	637.82	202.52
		8	38.90	12.79
		9	1282.57	200.32
		10	1284.99	154.85
				11
68	31.35	1	226.31	71.30
		2	12814.43	3188.02
		3	30532.71	8268.55
		4	29916.48	6368.61
		5	15448.68	2673.13
		6	5760.09	820.79
		7	689.60	218.03
		8	96.81	27.73
		9	1421.89	213.66
		10	1490.22	175.03
				11
69	31.71	1	324.42	101.78
		2	14403.25	3577.36
		3	34207.30	9269.81
		4	33411.31	7133.67
		5	17220.03	2988.45
		6	6432.91	922.07
		7	780.44	247.14
		8	64.78	21.34
		9	1614.81	251.73
		10	1548.66	184.62
				11
70	31.82	1	308.04	96.63

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		2	16113.27	3995.94
		3	38014.93	10287.99
		4	37177.14	7920.48
		5	19136.26	3317.24
		6	7127.64	1037.19
		7	833.17	263.92
		8	48.77	16.16
		9	1800.32	279.88
		10	1829.95	215.59
		11	2518.25	270.09
71	28.13	1	41.14	13.60
		2	1880.63	461.12
		3	4411.76	1186.05
		4	4268.62	912.66
		5	2277.28	389.03
		6	905.08	119.02
		7	116.69	36.63
		8	98.03	14.32
		9	340.43	29.72
		10	775.01	41.90
		11	775.01	35.17
72	28.37	1	52.94	16.42
		2	2570.31	631.95
		3	5932.59	1597.54
		4	5773.62	1236.17
		5	2968.96	523.78
		6	1257.92	163.46
		7	140.74	45.19
		8	58.48	12.69
		9	286.27	39.85
		10	342.71	38.28
		11	496.41	46.21
73	28.64	1	58.79	18.56
		2	3176.07	791.81
		3	7437.77	1990.75

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		4	7231.75	1532.96
		5	3807.24	639.41
		6	1446.63	196.54
		7	191.14	60.36
		8	92.79	13.40
		9	310.62	44.69
		10	1009.52	49.76
		11	1009.52	58.53
74	29.08	1	69.75	22.41
		2	4116.42	1024.94
		3	9813.90	2632.00
		4	9555.62	2039.07
		5	4929.49	847.58
		6	1910.83	275.36
		7	246.73	79.03
		8	24.79	7.49
		9	403.49	64.08
		10	420.70	51.98
		11	662.81	75.05
75	29.72	1	118.28	37.61
		2	5487.64	1366.44
		3	12929.63	3495.87
		4	12747.59	2700.29
		5	6527.99	1129.51
		6	2479.52	357.06
		7	320.29	101.29
		8	24.69	8.34
		9	608.28	89.90
		10	710.26	74.98
		11	846.53	92.14
76	30.34	1	84.25	26.49
		2	6253.05	1560.16
		3	14820.36	3983.42
		4	14514.71	3079.48
		5	7454.67	1289.48

		6	2901.40	401.72
		7	320.13	101.70
		8	55.89	12.57
		9	673.40	106.88
		10	803.17	84.85
		11	938.80	103.77
77	31.16	1	123.04	38.96
		2	8221.35	2042.72
		3	19404.66	5258.83
		4	19098.69	4073.73
		5	9868.96	1693.02
		6	3756.12	546.14
		7	440.51	139.71
		8	37.15	10.76
		9	820.33	130.78
		10	2251.70	103.60
		11	1326.65	135.96
78	31.2	1	113.84	35.71
		2	6814.23	1695.50
		3	16286.99	4412.21
		4	15963.98	3397.96
		5	8296.87	1433.21
		6	3163.69	455.18
		7	377.13	119.63
		8	50.06	16.66
		9	764.18	125.36
		10	816.17	92.83
		11	1059.91	120.28
79	31.71	1	165.28	52.72
		2	9430.10	2343.46
		3	22464.97	6077.55
		4	22007.19	4671.99
		5	11323.71	1958.17
		6	4204.74	619.28
		7	481.64	153.08

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		8	23.90	8.01
		9	1087.91	176.36
		10	1110.02	139.03
		11	1414.26	142.59
80	31.98	1	179.76	56.49
		2	8626.32	2152.94
		3	20708.69	5603.62
		4	20216.37	4304.22
		5	10516.25	1807.71
		6	3917.62	556.88
		7	466.83	147.72
		8	24.47	8.10
		9	976.89	147.21
		10	967.42	115.89
		11	1382.51	148.73
81	32.8	1	231.46	72.40
		2	12107.30	3006.80
		3	29042.07	7798.93
		4	28301.49	6020.11
		5	14645.06	2517.44
		6	5467.32	784.94
		7	661.63	209.52
		8	37.91	12.66
		9	1256.84	195.63
		10	1301.68	162.11
		11	1886.36	208.22
82	33.11	1	148.72	46.98
		2	10588.47	2642.02
		3	25450.47	6831.85
		4	24714.08	5256.74
		5	12798.07	2205.07
		6	4798.72	686.51
		7	586.91	186.12
		8	51.97	17.21
		9	1056.09	165.81

		10	1205.56	137.72
		11	1535.39	170.42
83	33.84	1	247.58	77.99
		2	14677.84	3648.09
		3	35408.23	9508.85
		4	34419.41	7316.35
		5	17810.01	3073.25
		6	6668.91	950.09
		7	744.82	236.45
		8	14.99	4.35
		9	1490.94	237.78
		10	1574.71	186.09
		11	2199.02	224.56
84	34.05	1	207.42	64.93
		2	12669.35	3150.41
		3	30488.70	8181.51
		4	29658.56	6295.45
		5	15289.67	2634.92
		6	5801.66	824.16
		7	671.66	214.03
		8	23.62	7.71
		9	1281.04	198.45
		10	1373.90	170.67
		11	1990.77	205.55
85	34.28	1	255.56	80.38
		2	14860.00	3701.09
		3	35749.56	9592.74
		4	34752.96	7376.37
		5	17831.11	3085.73
		6	6703.51	960.44
		7	776.24	245.83
		8	35.45	11.87
		9	1564.75	238.99
		10	1649.83	184.76
		11	2271.46	241.78

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

86	35.12	1	289.59	90.76
		2	17207.92	4281.39
		3	41594.95	11140.63
		4	40391.71	8567.16
		5	20710.50	3583.71
		6	7782.52	1117.67
		7	918.74	291.76
		8	33.81	11.45
		9	1800.69	273.44
		10	1913.27	223.34
		11	2602.57	277.75
87	34.65	1	233.53	73.51
		2	12519.30	3117.83
		3	30183.28	8105.46
		4	29211.30	6215.00
		5	15008.15	2579.31
		6	5621.85	804.13
		7	654.01	206.65
		8	45.69	15.50
		9	1318.09	202.88
		10	1336.30	151.78
		11	1899.83	206.94
88	34.68	1	228.38	71.67
		2	14079.75	3495.13
		3	33923.91	9113.88
		4	33089.88	7023.51
		5	17044.02	2930.65
		6	6272.32	899.49
		7	726.75	230.16
		8	101.76	32.25
		9	1608.72	235.80
		10	1657.26	198.07
		11	2202.12	228.71
89	35	1	264.25	82.90
		2	15776.56	3917.68

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		3	38140.23	10231.70		
		4	36919.47	7843.51		
		5	19037.55	3289.52		
		6	7155.17	1037.67		
		7	844.43	267.84		
		8	44.03	14.71		
		9	1671.06	254.46		
		10	1757.13	198.06		
		11	2358.32	250.71		
		90	35.33	1	299.37	94.38
				2	17524.45	4370.31
3	42311.78			11353.39		
4	41095.21			8730.92		
5	21250.03			3657.10		
6	7814.22			1128.10		
7	926.67			294.07		
8	65.24			22.04		
9	1873.20			292.18		
10	1972.24			231.57		
11	2680.58			287.74		
91	31.95	1	102.82	32.67		
		2	3316.94	821.59		
		3	7875.91	2127.27		
		4	7802.62	1648.52		
		5	4124.94	705.20		
		6	1635.76	208.63		
		7	196.34	64.04		
		8	49.40	11.49		
		9	334.41	52.36		
		10	920.96	51.81		
		11	488.53	58.91		
92	30.95	1	108.73	34.48		
		2	4952.95	1235.03		
		3	11635.00	3140.70		
		4	11545.29	2441.33		

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		5	5925.79	1015.52
		6	2320.38	338.14
		7	239.77	75.64
		8	53.27	9.67
		9	541.03	73.43
		10	1379.18	75.99
		11	1377.52	82.76
93	30.18	1	125.40	39.37
		2	7121.97	1772.45
		3	17042.68	4567.83
		4	16677.16	3553.60
		5	8618.32	1478.37
		6	3195.11	454.15
		7	370.46	117.70
		8	45.18	14.58
		9	840.24	125.51
		10	862.48	91.62
		11	1224.39	138.09
94	30.48	1	120.84	38.46
		2	8669.47	2149.71
		3	20440.61	5486.45
		4	20101.78	4279.86
		5	10289.86	1800.85
		6	3894.86	568.71
		7	474.91	150.10
		8	47.38	15.33
		9	998.96	159.75
		10	2412.70	123.88
		11	1425.73	143.69
95	31.27	1	243.49	77.44
		2	11107.54	2756.89
		3	26586.93	7129.54
		4	25925.27	5526.27
		5	13330.82	2301.58
		6	4950.10	710.77

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		7	590.30	187.00
		8	68.99	23.42
		9	1241.52	191.92
		10	3099.47	146.31
		11	1812.99	188.82
96	33.67	1	283.25	89.20
		2	13659.42	3397.59
		3	32388.37	8763.92
		4	31842.27	6777.53
		5	16356.18	2822.88
		6	6212.77	894.25
		7	727.83	230.76
		8	42.22	13.76
		9	1555.42	235.85
		10	1540.09	170.03
		11	2064.44	220.34
97	32.66	1	227.35	72.10
		2	11739.98	2922.77
		3	28049.03	7539.03
		4	27182.27	5802.56
		5	14160.33	2436.11
		6	5295.58	753.60
		7	641.07	203.90
		8	35.84	11.82
		9	1307.92	200.84
		10	1349.89	155.26
		11	1844.29	188.37
98	33.03	1	277.60	87.66
		2	13734.61	3419.29
		3	32786.52	8859.10
		4	32162.50	6843.09
		5	16464.92	2853.21
		6	6100.93	887.86
		7	684.41	216.32
		8	50.20	17.19

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		9	1497.24	229.76
		10	1579.72	183.13
		11	2182.10	230.54
99	33.92	1	309.02	97.60
		2	15962.53	3978.77
		3	38039.90	10290.59
		4	37317.94	7936.74
		5	19248.67	3323.38
		6	7172.39	1035.14
		7	848.42	268.77
		8	53.86	15.47
		9	1792.25	266.66
		10	1728.09	193.32
		11	2617.85	262.27
100	33.25	1	225.45	70.74
		2	11712.24	2920.50
		3	27711.08	7499.16
		4	27204.73	5786.64
		5	13976.97	2412.31
		6	5261.46	759.34
		7	602.52	190.06
		8	60.51	17.34
		9	1329.48	211.33
		10	1334.95	157.08
		11	1839.14	190.55
101	33.73	1	245.71	77.28
		2	13188.76	3285.93
		3	31309.00	8479.34
		4	30630.04	6513.16
		5	15864.36	2745.77
		6	5916.62	848.82
		7	688.66	218.14
		8	44.79	14.52
		9	1482.82	225.28
		10	1498.12	173.63

		11	2124.07	231.95
102	34.05	1	275.48	87.12
		2	14748.75	3676.60
		3	35164.07	9522.98
		4	34332.82	7321.97
		5	17790.37	3064.51
		6	6553.36	960.93
		7	771.30	244.12
		8	63.63	21.18
		9	1604.32	245.89
		10	1766.33	201.78
				11
103	33.29	1	332.52	104.71
		2	16362.22	4082.67
		3	38793.59	10520.25
		4	37964.31	8087.40
		5	19525.72	3362.71
		6	7349.32	1056.49
		7	853.58	270.57
		8	49.79	16.41
		9	1827.02	288.80
		10	1880.38	217.74
				11
104	28.66	1	58.27	17.60
		2	621.31	151.55
		3	1507.00	400.06
		4	1438.24	291.49
		5	762.00	123.13
		6	406.35	38.30
		7	196.55	19.83
		8	375.26	16.03
		9	628.89	19.17
		10	187.39	17.34
				11
105	28.9	1	43.43	13.75

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		2	1036.93	260.50
		3	2398.88	643.02
		4	2334.14	496.74
		5	1216.69	212.43
		6	602.17	72.05
		7	81.58	25.81
		8	248.02	15.61
		9	178.72	30.89
		10	490.41	23.41
		11	490.41	21.55
		106	29.22	1
2	1399.26			358.36
3	3201.67			870.51
4	3195.70			666.77
5	1633.92			281.72
6	699.98			91.05
7	112.13			33.11
8	87.39			10.12
9	584.27			23.80
10	1368.43			24.19
11	1368.43			22.82
107	29.58	1	71.59	22.55
		2	2285.34	562.91
		3	5184.70	1398.24
		4	5088.08	1073.38
		5	2742.94	462.90
		6	892.19	137.87
		7	159.66	50.79
		8	147.32	16.24
		9	320.17	45.08
		10	779.52	34.93
		11	779.52	41.12
108	30.42	1	99.82	31.15
		2	3601.94	888.04
		3	8159.22	2220.33

		4	8035.63	1702.76
		5	4238.58	730.03
		6	1686.96	237.73
		7	208.16	65.99
		8	77.49	12.78
		9	371.81	56.56
		10	435.70	48.74
		11	524.35	59.62
109	31.3	1	147.93	46.85
		2	5969.30	1479.93
		3	13728.56	3699.14
		4	13406.43	2844.27
		5	7000.61	1196.32
		6	2640.94	369.21
		7	354.66	112.81
		8	26.71	8.70
		9	570.79	95.12
		10	661.13	72.78
		11	803.16	87.63
110	31.13	1	78.95	25.21
		2	5415.92	1346.10
		3	12473.63	3387.76
		4	12284.48	2611.08
		5	6408.48	1098.43
		6	2440.39	339.09
		7	298.47	94.62
		8	35.47	10.62
		9	587.36	91.31
		10	537.96	74.05
		11	813.11	79.17
111	31.64	1	155.53	48.97
		2	7704.72	1904.06
		3	17592.41	4780.25
		4	17265.89	3663.38
		5	9040.74	1534.91

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		6	3402.79	480.37
		7	422.57	134.28
		8	44.86	15.08
		9	763.09	112.48
		10	750.58	101.50
		11	1085.20	110.75
112	31.92	1	170.12	52.94
		2	7424.69	1833.43
		3	16884.51	4584.04
		4	16586.06	3514.79
		5	8585.55	1476.40
		6	3306.92	455.95
		7	440.73	139.06
		8	42.07	12.99
		9	706.91	122.25
		10	765.27	97.42
		11	1044.59	116.23
113	32.65	1	210.46	66.03
		2	10412.02	2579.75
		3	23907.96	6435.85
		4	23327.98	4947.17
		5	12005.28	2071.11
		6	4547.13	645.46
		7	586.98	186.63
		8	35.87	12.16
		9	906.79	151.86
		10	1021.63	125.73
		11	1431.20	149.58
114	32.53	1	183.97	57.93
		2	9079.44	2253.76
		3	20850.80	5663.88
		4	20491.82	4344.34
		5	10617.04	1818.23
		6	4047.39	568.58
		7	478.02	152.46

		8	51.63	16.85
		9	826.12	135.33
		10	1019.81	120.66
		11	1282.49	139.02
115	33.17	1	281.67	88.36
		2	12705.72	3148.35
		3	29094.87	7895.42
		4	28635.49	6060.97
		5	14796.39	2529.59
		6	5596.11	794.35
		7	695.71	220.41
		8	43.95	13.39
		9	1243.72	199.13
		10	1296.82	153.77
		11	1689.02	180.38
116	33.33	1	240.61	75.69
		2	10873.85	2690.70
		3	24868.10	6742.80
		4	24430.76	5175.68
		5	12680.05	2159.16
		6	4750.29	665.18
		7	598.71	189.79
		8	55.15	16.45
		9	1039.92	162.41
		10	1182.18	141.00
		11	1449.20	157.58
117	33.53	1	269.77	84.80
		2	12685.81	3151.90
		3	29183.10	7902.77
		4	28521.94	6038.38
		5	14836.98	2533.63
		6	5698.47	783.60
		7	698.65	221.26
		8	41.20	13.42
		9	1163.14	182.93

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		10	1250.43	150.82
		11	1713.54	183.28
118	34.32	1	309.95	97.44
		2	14699.31	3647.69
		3	33877.38	9178.35
		4	33231.50	7019.22
		5	17244.74	2938.68
		6	6532.50	900.93
		7	794.73	251.61
		8	45.08	14.85
		9	1359.71	210.89
		10	1488.13	176.63
		11	2026.83	216.49
119	33.31	1	240.86	75.37
		2	10574.82	2631.25
		3	24312.22	6590.28
		4	23905.69	5065.08
		5	12378.96	2110.03
		6	4643.27	653.82
		7	567.67	179.93
		8	44.05	14.64
		9	1017.22	155.69
		10	1065.95	137.82
		11	1495.27	165.20
120	33.37	1	257.07	80.40
		2	11965.09	2962.82
		3	27692.73	7442.96
		4	26974.50	5719.51
		5	13988.67	2397.20
		6	5319.30	742.64
		7	644.98	204.12
		8	36.37	12.50
		9	1135.35	186.33
		10	1201.24	144.90
		11	1622.94	177.10

121	33.78	1	269.98	85.33
		2	13414.43	3327.83
		3	30810.97	8344.93
		4	30258.11	6419.10
		5	15722.84	2690.04
		6	5934.07	838.63
		7	740.12	234.98
		8	105.28	30.86
		9	1323.42	206.62
		10	1413.25	170.33
		11	1902.36	208.49
122	33.76	1	352.91	110.55
		2	14952.85	3706.17
		3	34332.28	9301.80
		4	33606.81	7105.07
		5	17448.15	2983.36
		6	6595.95	931.65
		7	808.08	256.47
		8	66.98	19.46
		9	1391.63	232.35
		10	1606.66	177.03
		11	2093.86	220.34
123	27.19	1	55.66	17.39
		2	1805.40	434.10
		3	4081.59	1109.38
		4	4097.11	866.47
		5	2071.64	363.90
		6	766.36	101.80
		7	126.44	37.16
		8	45.66	12.61
		9	622.49	30.19
		10	311.87	24.26
		11	288.34	30.65
124	28.12	1	98.80	30.89
		2	4200.78	1046.80

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		3	9780.89	2627.11		
		4	9587.67	2035.58		
		5	4961.38	853.34		
		6	1833.26	257.11		
		7	246.63	78.18		
		8	47.82	15.73		
		9	362.28	59.94		
		10	1083.08	59.50		
		11	623.98	64.41		
		125	29.27	1	136.34	42.37
				2	6876.82	1705.16
3	15873.61			4305.88		
4	15492.93			3293.12		
5	8074.56			1387.55		
6	3036.07			423.64		
7	382.96			122.47		
8	58.90			17.40		
9	635.16			101.78		
10	728.10			85.06		
11	1059.02			98.94		
126	29.63	1	165.79	52.23		
		2	8127.60	2012.01		
		3	18779.64	5080.18		
		4	18412.38	3908.36		
		5	9535.03	1633.18		
		6	3593.22	509.74		
		7	433.62	137.38		
		8	46.79	16.07		
		9	760.32	128.83		
		10	2119.09	110.48		
		11	1219.57	127.82		
127	30.46	1	252.10	80.35		
		2	10666.45	2648.06		
		3	24771.10	6656.72		
		4	24058.62	5109.28		

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		5	12571.43	2140.47
		6	4687.65	652.47
		7	565.68	179.15
		8	33.77	10.86
		9	1004.72	151.98
		10	1019.53	123.92
		11	1462.54	147.49
128	31.56	1	291.19	91.01
		2	12912.78	3182.48
		3	30042.60	8073.16
		4	29091.27	6173.46
		5	15126.38	2589.73
		6	5695.80	797.94
		7	651.57	206.54
		8	53.28	17.88
		9	1238.13	190.56
		10	1294.32	155.22
		11	1786.88	197.97
129	31.22	1	227.01	71.27
		2	11141.43	2763.93
		3	25497.65	6896.85
		4	25031.30	5307.52
		5	13076.66	2225.65
		6	4939.71	696.68
		7	616.28	194.94
		8	78.21	24.20
		9	1058.68	180.86
		10	1171.63	124.80
		11	1494.42	152.62
130	31.75	1	257.67	81.44
		2	12911.65	3205.52
		3	29831.88	8059.28
		4	29186.05	6190.92
		5	15182.21	2598.88
		6	5711.84	806.98

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		7	650.69	206.27
		8	60.48	20.76
		9	1220.14	195.21
		10	1355.11	166.64
		11	1802.77	193.79
131	32.48	1	295.56	93.58
		2	14890.94	3691.36
		3	34790.13	9340.57
		4	33943.95	7180.18
		5	17543.17	3014.01
		6	6557.01	936.41
		7	813.15	257.84
		8	65.96	20.30
		9	1412.66	220.56
		10	1577.49	191.26
		11	2012.04	214.83
132	32.16	1	205.57	64.75
		2	10952.34	2703.28
		3	25213.68	6762.69
		4	24559.34	5203.78
		5	12739.54	2190.91
		6	4849.17	682.34
		7	571.02	180.99
		8	63.10	20.61
		9	1025.06	148.07
		10	1137.79	138.55
		11	1518.00	166.18
133	32.09	1	234.37	73.97
		2	12218.87	3024.01
		3	28430.11	7630.58
		4	27651.66	5864.31
		5	14358.44	2449.95
		6	5389.64	771.07
		7	661.47	209.85
		8	34.75	12.02

		9	1245.07	194.83
		10	1311.72	143.98
		11	1724.05	180.37
134	32.33	1	266.08	84.19
		2	13644.69	3379.63
		3	31472.67	8510.61
		4	30941.86	6563.28
		5	15953.35	2746.49
		6	5894.76	840.23
		7	693.35	219.99
		8	46.20	15.89
		9	1356.08	211.15
		10	1379.52	167.14
		11	1995.52	213.72
135	32.84	1	300.99	94.81
		2	15210.89	3761.79
		3	35344.48	9488.45
		4	34403.48	7299.63
		5	17772.31	3052.02
		6	6698.20	946.03
		7	819.84	259.37
		8	30.65	10.32
		9	1484.47	228.70
		10	1558.87	190.84
		11	2201.90	221.99
136	30.47	1	28.70	8.97
		2	1958.99	478.70
		3	4720.45	1232.56
		4	4479.21	946.08
		5	2363.96	410.88
		6	751.88	116.56
		7	90.65	26.61
		8	148.29	9.58
		9	470.85	44.55
		10	643.64	33.49

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		11	643.64	27.90
137	29.19	1	42.88	13.99
		2	1139.60	286.69
		3	2692.53	733.46
		4	2653.74	567.94
		5	1412.04	231.86
		6	543.88	81.11
		7	151.90	19.51
		8	73.56	17.77
		9	548.65	19.17
		10	499.11	28.21
				11
138	29.4	1	95.99	31.08
		2	2943.89	743.54
		3	7052.80	1892.89
		4	6836.63	1455.81
		5	3548.93	599.48
		6	1364.62	182.33
		7	171.19	54.07
		8	124.59	14.11
		9	379.48	58.37
		10	965.42	47.19
				11
139	30.04	1	119.99	38.45
		2	5070.04	1252.97
		3	11665.45	3134.72
		4	11389.62	2427.35
		5	5949.92	993.99
		6	2215.87	308.58
		7	275.29	87.44
		8	46.08	14.00
		9	816.16	68.23
		10	587.74	68.51
				11
140	30.37	1	100.83	31.70

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		2	6014.31	1492.17
		3	13722.68	3713.61
		4	13585.81	2884.43
		5	6996.40	1191.97
		6	2670.12	374.77
		7	301.68	96.48
		8	62.25	8.63
		9	661.35	117.28
		10	1518.52	84.17
		11	1518.52	81.13
		141	30.85	1
2	7738.81			1924.94
3	17829.77			4821.32
4	17486.60			3708.99
5	8974.72			1552.58
6	3517.59			488.73
7	410.58			129.66
8	35.98			11.87
9	788.23			118.30
10	2026.97			113.56
11	2026.97			107.85
142	31.48	1	178.85	56.02
		2	9429.69	2328.75
		3	21713.93	5828.22
		4	21132.82	4510.59
		5	11033.51	1887.61
		6	4164.61	584.08
		7	458.39	144.74
		8	70.73	23.43
		9	980.46	156.68
		10	939.28	109.79
		11	1302.04	140.95
143	31.68	1	179.96	56.75
		2	10223.77	2535.78
		3	23993.63	6257.33

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		4	22956.54	4881.60
		5	11967.02	2048.26
		6	4520.47	639.78
		7	589.70	187.22
		8	76.93	19.58
		9	978.71	159.66
		10	2508.53	129.06
		11	1402.96	152.16
144	31.73	1	157.25	49.65
		2	6199.88	1538.58
		3	14546.92	3836.81
		4	14048.21	2980.71
		5	7389.75	1259.02
		6	2760.98	392.66
		7	353.74	113.29
		8	52.58	15.90
		9	619.29	100.10
		10	693.40	76.71
		11	854.73	92.36
145	28.98	1	56.92	18.03
		2	2200.82	542.08
		3	5455.79	1430.61
		4	5343.32	1134.49
		5	2772.80	479.24
		6	866.37	142.25
		7	140.57	42.86
		8	90.83	10.60
		9	245.31	37.49
		10	762.67	33.24
		11	762.67	36.72
146	29.51	1	47.76	15.29
		2	3608.39	895.79
		3	8504.40	2302.05
		4	8285.22	1785.13
		5	4395.91	748.90

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		6	1698.63	239.68
		7	227.25	72.06
		8	73.46	15.77
		9	767.24	60.53
		10	578.60	57.05
		11	626.10	67.51
147	29.85	1	65.75	20.67
		2	4313.35	1064.37
		3	10612.99	2774.49
		4	10071.09	2137.20
		5	5348.13	906.36
		6	1976.87	288.96
		7	258.86	82.57
		8	72.65	15.55
		9	440.24	76.03
		10	1384.76	67.70
		11	1352.09	85.74
148	29.61	1	25.32	7.87
		2	2700.84	671.08
		3	6654.43	1727.85
		4	6383.44	1356.30
		5	3293.62	575.74
		6	1324.89	182.02
		7	162.70	51.91
		8	80.69	15.48
		9	505.15	44.94
		10	909.16	42.89
		11	903.50	54.89
149	29.89	1	78.39	24.28
		2	3774.42	945.16
		3	9239.16	2478.26
		4	9081.72	1944.43
		5	4767.05	807.61
		6	1814.34	255.07
		7	169.23	54.93

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		8	103.12	17.02
		9	487.44	77.28
		10	1317.78	62.33
		11	1317.78	66.14
150	30.16	1	114.58	36.45
		2	4984.57	1242.84
		3	12077.60	3226.01
		4	11746.18	2493.53
		5	6042.85	1041.95
		6	2325.83	342.15
		7	279.83	86.23
		8	67.52	13.46
		9	571.21	90.09
		10	1572.17	74.76
		11	1572.17	90.28
151	30.48	1	117.37	36.91
		2	6281.68	1545.36
		3	15330.61	4021.50
		4	14622.48	3112.61
		5	7522.43	1302.17
		6	2891.07	416.14
		7	332.78	105.51
		8	50.55	16.54
		9	719.13	99.64
		10	774.03	88.49
		11	1211.39	120.92
152	30.51	1	109.84	34.61
		2	6152.46	1527.51
		3	15176.97	3960.28
		4	14527.47	3090.69
		5	7487.38	1295.45
		6	2845.43	412.28
		7	271.17	85.89
		8	22.14	7.42
		9	757.59	123.57

		10	834.20	82.99
		11	988.57	114.96
153	31.16	1	138.93	44.69
		2	8065.30	2004.50
		3	19858.86	5190.21
		4	18994.09	4052.98
		5	9825.88	1690.94
		6	3707.29	533.35
		7	474.84	149.86
		8	75.91	22.09
		9	945.07	137.93
		10	985.64	119.98
		11	1330.62	153.62
154	31.04	1	122.84	39.13
		2	6551.51	1622.57
		3	16200.86	4234.90
		4	15490.87	3302.76
		5	8030.03	1378.81
		6	2921.40	414.75
		7	373.69	118.10
		8	53.26	17.22
		9	795.39	136.28
		10	1935.68	107.85
		11	1935.68	119.96
155	31.53	1	175.99	55.28
		2	9123.81	2265.32
		3	22516.75	5874.96
		4	21408.45	4574.27
		5	11101.52	1915.14
		6	4163.86	595.50
		7	464.29	147.97
		8	78.67	24.69
		9	1147.06	178.39
		10	1114.17	148.02
		11	1556.20	169.94

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

156	30.45	1	108.62	34.20
		2	5864.08	1454.83
		3	14286.39	3752.55
		4	13697.87	2941.58
		5	7084.26	1233.56
		6	2331.93	364.12
		7	343.38	108.80
		8	69.89	23.08
		9	1176.38	104.97
		10	684.35	81.51
		11	992.41	103.15
157	31.45	1	177.02	56.88
		2	9317.67	2302.69
		3	22806.46	5987.91
		4	21983.03	4686.25
		5	11311.02	1951.85
		6	4216.91	619.70
		7	559.51	177.71
		8	67.29	20.69
		9	1151.09	176.97
		10	2762.37	142.13
		11	2762.37	165.12
158	31.91	1	218.55	68.48
		2	12769.46	3175.47
		3	31620.10	8238.97
		4	30009.63	6418.30
		5	15247.70	2656.03
		6	5729.77	829.26
		7	665.70	211.74
		8	93.01	28.25
		9	1543.41	249.65
		10	1590.58	197.48
		11	2069.73	217.45
159	32.74	1	264.35	83.70
		2	16577.01	4109.55

		3	41135.50	10715.58		
		4	39083.84	8342.75		
		5	20111.43	3480.51		
		6	7265.60	1063.26		
		7	839.03	265.80		
		8	99.90	28.43		
		9	1939.28	295.52		
		10	2073.38	237.48		
		11	2883.28	295.95		
		160	32.4	1	196.61	62.30
				2	12581.54	3117.27
3	31018.84			8071.51		
4	29471.99			6296.02		
5	15073.33			2616.60		
6	5536.13			806.14		
7	631.59			199.77		
8	123.67			40.23		
9	1554.86			229.69		
10	3688.37			172.36		
11	2169.81			224.88		
161	32.84	1	254.61	80.39		
		2	14527.64	3607.30		
		3	35884.64	9342.93		
		4	34165.23	7294.73		
		5	17491.33	3032.96		
		6	6425.32	930.90		
		7	764.75	243.31		
		8	85.24	28.53		
		9	1761.57	273.76		
		10	1766.51	210.58		
		11	2510.55	255.42		
162	33.25	1	269.45	85.23		
		2	16555.16	4104.24		
		3	41099.10	10688.97		
		4	39060.65	8329.95		

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		5	20129.47	3477.32
		6	7193.33	1058.10
		7	848.03	269.71
		8	94.31	28.25
		9	2023.83	323.32
		10	5068.87	240.56
		11	2905.27	287.14
163	33.58	1	315.22	99.87
		2	18897.58	4672.33
		3	46777.98	12160.12
		4	44461.50	9496.73
		5	22744.11	3950.82
		6	8320.51	1218.52
		7	958.59	304.14
		8	112.46	36.68
		9	2276.78	355.32
		10	2354.99	275.61
		11	3235.18	329.04
164	30.55	1	45.91	14.22
		2	2055.07	514.54
		3	5189.38	1356.05
		4	5139.20	1091.40
		5	2728.03	466.34
		6	926.16	148.48
		7	144.37	44.51
		8	211.10	14.56
		9	588.81	37.35
		10	1114.59	35.94
		11	1114.59	33.92
165	30.37	1	67.60	16.70
		2	2694.36	662.00
		3	6536.78	1696.24
		4	6255.98	1326.41
		5	3319.18	562.86
		6	621.51	192.84

		7	236.03	68.81
		8	120.28	19.23
		9	598.07	45.16
		10	1276.02	53.41
		11	1506.72	45.72
166	30.36	1	63.43	20.15
		2	3272.33	808.15
		3	8169.67	2137.89
		4	7855.57	1662.89
		5	4081.05	703.59
		6	1626.00	219.45
		7	196.40	61.66
		8	147.05	15.65
		9	400.55	62.86
		10	1000.39	48.44
		11	1000.39	61.42
167	30.21	1	92.10	27.70
		2	4142.32	1008.69
		3	9917.87	2603.23
		4	9532.01	2044.41
		5	5055.49	864.27
		6	1861.79	259.73
		7	174.22	55.29
		8	97.71	26.62
		9	875.79	76.47
		10	1233.60	71.89
		11	1233.60	70.11
168	30.36	1	79.92	24.73
		2	3725.16	918.36
		3	9275.76	2409.70
		4	8983.31	1918.55
		5	4727.37	810.42
		6	1829.93	255.12
		7	211.27	66.28
		8	126.84	23.19

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		9	525.79	73.92
		10	668.61	65.75
		11	639.10	75.05
169	30.5	1	93.38	29.57
		2	4879.79	1211.20
		3	11967.46	3106.61
		4	11470.65	2442.56
		5	5955.58	1025.78
		6	2263.48	313.12
		7	298.80	94.01
		8	37.57	12.51
		9	542.41	94.22
		10	1516.33	86.26
		11	1512.53	94.40
170	30.48	1	479.05	27.68
		2	0.00	0.00
		3	832.78	13.27
		4	832.78	19.75
		5	832.78	14.56
		6	439.05	23.74
		7	0.00	0.00
		8	406.24	22.80
		9	1646.83	25.46
		10	533.85	22.63
		11	439.46	15.79
171	30.62	1	124.20	39.56
		2	5940.47	1476.31
		3	14772.86	3842.57
		4	14089.91	3019.41
		5	7311.21	1267.82
		6	2709.85	392.60
		7	336.01	106.79
		8	57.15	16.65
		9	761.31	116.69
		10	1914.79	107.60

		11	1914.79	114.45
172	31.02	1	119.04	37.23
		2	7678.19	1915.49
		3	19087.44	4973.92
		4	18271.37	3895.08
		5	9433.78	1631.88
		6	3552.66	514.58
		7	469.21	149.14
		8	68.30	22.35
		9	902.86	134.05
		10	992.15	103.93
		11	1352.20	141.12
173	30.83	1	100.62	32.43
		2	6412.90	1583.31
		3	15759.81	4092.77
		4	15027.47	3232.62
		5	7800.30	1342.28
		6	2948.92	441.03
		7	347.41	110.79
		8	68.96	19.76
		9	775.02	128.76
		10	1896.44	106.47
		11	1888.91	123.44
174	31.3	1	139.12	44.50
		2	8745.95	2168.78
		3	21670.45	5637.17
		4	20723.97	4432.49
		5	10620.16	1845.55
		6	3908.62	576.17
		7	541.84	172.63
		8	82.10	23.53
		9	1024.61	163.89
		10	2684.85	141.01
		11	2674.34	159.72
175	31.46	1	136.39	43.15

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		2	9180.10	2214.18
		3	21992.92	5765.90
		4	21257.18	4535.53
		5	11059.00	1911.58
		6	4092.27	592.88
		7	491.20	156.92
		8	97.35	25.14
		9	1104.65	167.11
		10	1276.26	133.97
		11	1577.99	165.21
		176	31.91	1
2	12462.92			3019.25
3	30179.34			7852.12
4	28732.50			6146.19
5	14816.38			2564.02
6	5486.74			809.35
7	653.36			208.81
8	118.37			36.22
9	1568.34			231.44
10	1499.75			179.64
11	2009.93			208.22
177	32.34	1	317.04	100.24
		2	16099.29	3885.46
		3	38987.23	10142.91
		4	37118.63	7952.92
		5	19129.86	3301.21
		6	6974.26	1028.66
		7	867.14	275.18
		8	128.32	36.75
		9	1980.39	309.35
		10	1950.85	229.20
		11	2731.00	292.81
178	31.97	1	196.54	62.12
		2	12379.59	2994.83
		3	29485.17	7728.72

		4	28334.54	6060.73
		5	14539.29	2525.77
		6	5299.23	780.18
		7	608.49	193.14
		8	97.09	31.83
		9	1484.56	223.36
		10	3637.56	190.71
		11	2102.16	227.06
179	32.36	1	216.31	68.67
		2	13933.37	3469.09
		3	34446.67	8952.48
		4	32751.47	7032.46
		5	16761.15	2913.57
		6	6301.55	903.87
		7	704.73	223.31
		8	82.77	25.01
		9	1824.71	273.29
		10	1720.80	208.89
		11	2381.38	246.23
180	32.55	1	280.84	88.62
		2	15891.16	3933.19
		3	39051.34	10215.72
		4	37391.35	8004.55
		5	19143.11	3329.74
		6	7052.10	1027.00
		7	712.33	225.00
		8	137.73	41.58
		9	2061.30	322.95
		10	2004.85	239.44
		11	2822.57	278.81
181	32.79	1	343.72	109.08
		2	18416.16	4440.94
		3	44416.22	11549.05
		4	42225.62	9038.42
		5	21740.55	3770.41

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		6	7873.68	1163.31
		7	915.55	291.05
		8	131.55	43.64
		9	2315.20	346.43
		10	2240.76	260.74
		11	3052.52	325.78
182	31.06	1	31.56	8.31
		2	2159.27	522.07
		3	5356.73	1385.54
		4	5065.35	1088.87
		5	2520.61	456.11
		6	1069.94	151.26
		7	196.22	57.48
		8	194.84	24.11
		9	805.23	46.46
		10	852.01	47.74
		11	852.01	52.78
183	31.03	1	26.70	8.53
		2	4558.04	1101.25
		3	10844.86	2849.76
		4	10497.63	2255.86
		5	5479.92	937.88
		6	2016.74	292.35
		7	255.62	81.94
		8	42.22	10.61
		9	713.84	90.51
		10	1351.26	69.57
		11	1351.26	79.38
184	31.29	1	67.81	21.33
		2	4544.69	1127.68
		3	11150.42	2924.01
		4	10802.16	2319.78
		5	5625.30	951.07
		6	1887.63	308.39
		7	237.94	76.21

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		8	82.29	19.97
		9	567.26	74.62
		10	1652.13	84.36
		11	1652.13	80.21
185	31.05	1	40.26	12.56
		2	2982.11	726.91
		3	7118.51	1846.09
		4	6763.40	1452.37
		5	3567.85	613.47
		6	1487.84	197.78
		7	169.81	54.11
		8	52.72	17.26
		9	791.98	64.00
		10	1158.26	37.82
		11	1129.93	62.91
186	30.89	1	50.05	15.58
		2	2161.34	532.54
		3	5388.24	1400.04
		4	5167.22	1078.48
		5	2622.68	462.78
		6	1084.36	145.63
		7	151.82	42.86
		8	119.15	31.66
		9	550.57	54.22
		10	801.94	33.36
		11	785.16	50.77
188	30.01	1	41.40	13.23
		2	1890.11	464.26
		3	4584.21	1206.02
		4	4495.16	962.23
		5	2261.43	387.34
		6	731.63	120.34
		7	129.27	40.66
		8	135.76	17.98
		9	699.37	47.21

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		10	642.55	38.17
		11	451.43	46.71
189	30.44	1	81.66	25.32
		2	5751.67	1393.22
		3	13625.39	3561.52
		4	13024.52	2796.82
		5	6667.19	1169.55
		6	2484.59	372.71
		7	311.52	99.45
		8	102.41	19.81
		9	696.10	104.47
		10	706.73	79.21
		11	1062.47	115.15
190	30.78	1	100.97	32.29
		2	9160.22	2219.39
		3	21989.58	5719.59
		4	20973.52	4490.10
		5	10772.27	1858.35
		6	4016.70	578.78
		7	522.30	165.96
		8	58.87	19.18
		9	968.64	150.78
		10	2742.11	129.28
		11	2742.11	161.33
191	31.21	1	192.16	61.02
		2	12494.87	3016.91
		3	29921.05	7793.49
		4	28561.17	6112.11
		5	14618.35	2535.93
		6	5393.16	784.32
		7	680.83	216.08
		8	51.15	17.24
		9	1442.42	226.55
		10	3542.49	172.91
		11	3538.12	218.84

192	31.56	1	220.37	70.51
		2	15525.71	3756.65
		3	37605.77	9792.52
		4	35585.24	7609.19
		5	18343.02	3173.60
		6	6820.00	981.37
		7	760.19	240.92
		8	71.83	20.71
		9	1693.22	260.85
		10	1840.27	211.16
		11	2515.32	263.29
193	31.45	1	261.95	83.00
		2	13593.58	3296.83
		3	32678.74	8508.72
		4	30982.36	6638.32
		5	16010.78	2759.61
		6	5789.96	846.47
		7	695.23	220.77
		8	85.16	27.98
		9	1510.88	228.99
		10	3999.50	195.13
		11	3992.46	240.48
194	31.75	1	278.57	88.46
		2	15741.56	3911.26
		3	38760.06	10099.91
		4	36969.06	7919.21
		5	19027.18	3294.77
		6	6863.13	1000.74
		7	761.78	242.88
		8	183.12	44.93
		9	1837.53	286.21
		10	1906.87	214.86
		11	2638.03	275.01
195	32.08	1	305.28	96.34
		2	18912.02	4567.44

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		3	45702.39	11890.17		
		4	43511.24	9294.49		
		5	22199.08	3844.75		
		6	8180.08	1187.89		
		7	983.00	312.07		
		8	126.99	39.69		
		9	1964.05	321.02		
		10	2185.66	260.89		
		11	3112.24	318.70		
		196	31.76	1	254.93	80.98
				2	13864.10	3363.78
3	33496.88			8717.25		
4	31639.55			6788.02		
5	16357.57			2842.60		
6	6006.22			870.95		
7	695.74			220.17		
8	79.59			23.50		
9	1601.38			248.95		
10	1742.12			198.22		
11	2270.52			241.25		
197	31.91	1	290.50	92.42		
		2	15721.71	3815.47		
		3	37888.61	9855.32		
		4	35930.50	7679.89		
		5	18435.27	3188.38		
		6	6841.23	991.25		
		7	748.96	236.93		
		8	120.50	38.59		
		9	1763.65	273.24		
		10	2023.75	231.98		
		11	2671.17	282.08		
198	32.04	1	293.66	92.94		
		2	17512.78	4239.08		
		3	42380.46	11030.25		
		4	40378.09	8642.77		

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		5	20567.45	3585.58
		6	7603.37	1113.68
		7	872.51	276.03
		8	117.94	34.18
		9	2036.47	311.10
		10	2126.51	243.70
		11	2926.58	298.00
199	32.04	1	332.08	106.10
		2	19520.61	4720.10
		3	47137.00	12259.70
		4	44694.79	9561.20
		5	23044.18	3997.85
		6	8546.45	1239.15
		7	943.67	301.59
		8	114.21	37.82
		9	2159.72	336.31
		10	2320.02	265.72
		11	3211.07	339.41
200	28.99	1	190.77	16.50
		2	264.53	24.57
		3	878.38	35.40
		4	878.38	40.70
		5	1408.86	20.81
		6	1408.86	21.87
		7	1933.86	17.83
		8	517.56	13.02
		9	2436.65	15.54
		10	2436.65	16.28
		11	1496.12	25.19
202	28.91	1	31.14	9.11
		2	747.67	176.62
		3	1750.65	464.69
		4	1762.97	362.67
		5	1000.48	147.74
		6	138.35	43.78

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		7	118.19	18.32
		8	292.25	18.11
		9	824.66	34.84
		10	545.82	20.81
		11	545.82	25.16
203	29.79	1	46.17	14.70
		2	2623.84	654.87
		3	6342.19	1704.12
		4	6208.14	1333.13
		5	3241.65	568.79
		6	1267.94	170.91
		7	156.44	48.49
		8	160.69	14.09
		9	375.65	59.84
		10	1186.84	51.39
		11	709.01	68.08
204	33.45	1	98.91	30.98
		2	6551.06	1628.49
		3	15661.69	4194.82
		4	15300.31	3254.42
		5	7778.16	1352.52
		6	2976.76	420.09
		7	326.05	104.03
		8	78.14	26.30
		9	893.00	135.63
		10	2149.88	103.05
		11	2052.80	122.10
205	35.45	1	152.50	48.15
		2	7468.49	1852.21
		3	18015.73	4864.67
		4	17656.99	3789.68
		5	9090.22	1582.41
		6	3265.60	494.76
		7	394.38	125.22
		8	95.40	23.42

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		9	1003.83	157.66
		10	2358.59	112.27
		11	2358.59	145.33
206	37.65	1	156.55	49.53
		2	9693.30	2395.88
		3	23717.07	6247.95
		4	22632.25	4861.56
		5	11659.55	2026.78
		6	4255.26	632.80
		7	516.35	164.25
		8	64.25	19.37
		9	1223.22	198.11
		10	1292.62	143.07
		11	1655.81	179.32
207	38.12	1	200.68	64.09
		2	11534.17	2866.36
		3	28183.81	7427.23
		4	27067.17	5791.93
		5	13792.35	2404.79
		6	5226.45	754.43
		7	589.69	186.40
		8	98.86	31.68
		9	1443.68	219.56
		10	1377.58	155.99
		11	1962.52	201.35
208	37.86	1	140.27	43.63
		2	8471.61	2108.42
		3	20989.65	5516.45
		4	20069.23	4280.99
		5	10300.73	1792.91
		6	3808.06	556.46
		7	474.82	150.65
		8	84.89	20.53
		9	1060.18	159.58
		10	1041.52	127.00

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		11	1611.02	179.45
209	38.62	1	243.76	77.39
		2	9818.62	2442.63
		3	24124.39	6345.75
		4	23093.85	4933.11
		5	11798.53	2058.98
		6	4409.95	627.65
		7	487.90	154.42
		8	70.93	21.46
		9	1336.81	192.05
		10	1308.87	141.58
				11
210	39.68	1	175.09	55.83
		2	11237.66	2793.48
		3	27627.23	7262.83
		4	26390.98	5642.16
		5	13541.98	2350.60
		6	4921.88	699.78
		7	595.72	188.60
		8	82.20	24.49
		9	1336.91	200.27
		10	1399.23	168.23
				11
211	41.04	1	222.59	70.67
		2	12733.32	3168.26
		3	31186.33	8217.31
		4	29960.58	6398.43
		5	15376.91	2673.16
		6	5675.76	841.70
		7	684.22	217.11
		8	119.13	34.42
		9	1525.85	243.17
		10	1542.66	185.05
				11
212	39.73	1	141.62	45.03

		2	10091.41	2513.09
		3	24911.49	6552.64
		4	23805.97	5083.45
		5	12270.89	2140.20
		6	4541.97	665.62
		7	524.58	166.61
		8	123.24	39.12
		9	1293.09	194.12
		10	3217.91	153.92
		11	1868.37	191.64
		213	35.38	1
2	6426.13			1591.62
3	16027.20			4178.25
4	15515.95			3283.79
5	8191.85			1402.63
6	3110.33			444.44
7	397.24			127.20
8	81.39			21.38
9	851.67			121.95
10	1912.19			99.84
11	1912.19			117.85
214	35.95	1	88.02	28.31
		2	6972.51	1728.26
		3	17326.55	4541.50
		4	16857.74	3596.83
		5	8766.70	1511.91
		6	3452.69	481.64
		7	418.37	132.76
		8	38.80	12.90
		9	909.20	143.00
		10	964.40	107.44
		11	1244.50	128.89
215	35.86	1	68.87	21.51
		2	7141.25	1724.69
		3	17312.40	4539.85

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		4	16833.52	3592.32
		5	8871.70	1528.08
		6	3435.50	475.86
		7	466.28	148.23
		8	64.06	20.88
		9	840.41	127.47
		10	2030.11	108.97
		11	2022.96	117.89
216	37.33	1	181.64	56.96
		2	8680.26	2149.96
		3	21437.29	5621.59
		4	20870.41	4449.16
		5	10983.51	1891.58
		6	4231.64	586.80
		7	548.15	174.78
		8	56.97	16.94
		9	991.64	155.62
		10	1193.28	131.65
		11	1528.69	167.62
217	36.58	1	132.01	41.56
		2	7599.69	1880.66
		3	19080.20	4958.24
		4	18367.17	3901.51
		5	9556.63	1672.46
		6	3735.03	521.21
		7	498.84	157.65
		8	67.58	17.52
		9	952.04	153.07
		10	1011.72	116.62
		11	1297.23	136.67
218	37.72	1	175.26	55.60
		2	9085.19	2242.38
		3	22625.50	5887.21
		4	21894.50	4662.88
		5	11461.56	1978.48

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		6	4467.18	633.39
		7	570.93	181.07
		8	49.89	16.34
		9	1061.01	170.44
		10	1208.95	141.72
		11	1534.95	157.09
219	38.95	1	152.69	48.43
		2	10599.97	2622.04
		3	26538.53	6900.66
		4	25632.32	5455.02
		5	13351.08	2294.80
		6	5168.41	731.82
		7	662.60	210.94
		8	94.27	28.01
		9	1358.14	209.17
		10	1326.42	158.52
		11	1805.28	187.70
220	39.43	1	188.03	58.46
		2	12335.60	3055.98
		3	30763.36	7994.37
		4	29680.42	6338.61
		5	15544.45	2666.03
		6	5949.39	847.70
		7	782.96	249.07
		8	61.75	20.34
		9	1491.89	231.73
		10	1513.12	181.23
		11	2068.01	214.66
221	38.06	1	109.94	35.62
		2	9292.40	2245.89
		3	22547.37	5914.15
		4	21730.33	4633.76
		5	11445.65	1971.03
		6	4433.83	628.39
		7	569.17	180.86

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		8	38.91	12.64
		9	1104.36	172.02
		10	1154.94	132.14
		11	1539.74	171.23
222	38.49	1	169.58	53.11
		2	10655.18	2572.81
		3	25759.84	6694.58
		4	24797.70	5285.05
		5	12872.63	2212.55
		6	4938.13	708.93
		7	603.11	191.34
		8	77.27	20.06
		9	1283.11	191.03
		10	1227.47	143.21
		11	1801.33	193.39
223	39.34	1	213.49	66.74
		2	11557.01	2870.25
		3	28975.84	7536.92
		4	27869.84	5945.27
		5	14453.17	2502.79
		6	5602.51	795.38
		7	703.87	223.64
		8	89.79	29.67
		9	1341.36	224.50
		10	1473.47	170.05
		11	1949.27	207.54
224	39.93	1	196.47	62.64
		2	13357.42	3216.31
		3	32321.69	8461.66
		4	31206.05	6665.36
		5	16246.29	2804.72
		6	6380.13	906.05
		7	743.74	237.82
		8	78.09	22.38
		9	1611.68	237.38

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		10	1490.34	178.18
		11	2112.95	223.06
225	38.28	1	143.44	44.46
		2	7904.49	1945.73
		3	19767.44	5164.30
		4	19227.73	4098.72
		5	9964.96	1729.73
		6	3965.81	559.89
		7	509.47	162.32
		8	83.20	27.55
		9	926.14	146.48
		10	1020.09	122.65
		11	1305.48	144.40
226	37.16	1	107.82	34.04
		2	6963.54	1689.06
		3	17077.18	4443.27
		4	16498.38	3517.29
		5	8513.95	1472.50
		6	3352.45	454.14
		7	448.68	142.31
		8	85.10	22.62
		9	921.50	139.53
		10	786.15	106.22
		11	1160.57	122.67
227	36.85	1	121.06	38.37
		2	6326.12	1554.06
		3	15700.10	4110.05
		4	15278.21	3241.29
		5	8056.98	1401.88
		6	3113.04	438.00
		7	371.69	118.90
		8	77.75	19.15
		9	823.35	133.20
		10	803.12	85.41
		11	1080.07	119.23

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

228	36.42	1	58.97	19.08
		2	5523.55	1365.73
		3	13564.39	3548.62
		4	13245.82	2807.73
		5	6843.94	1181.24
		6	2739.07	369.88
		7	366.65	116.06
		8	50.94	16.72
		9	706.64	103.45
		10	580.37	71.37
		11	1007.99	103.38
229	35.57	1	80.12	25.12
		2	6076.71	1521.93
		3	15478.31	4019.94
		4	15048.00	3208.73
		5	7910.59	1369.56
		6	3029.36	419.53
		7	458.81	144.96
		8	61.16	15.68
		9	782.12	120.66
		10	886.17	99.12
		11	962.92	98.04
230	34.35	1	64.54	20.49
		2	5118.65	1240.74
		3	12414.19	3218.22
		4	12015.98	2555.25
		5	6423.52	1099.27
		6	2452.85	335.23
		7	382.43	118.84
		8	88.71	13.74
		9	1031.57	88.04
		10	1513.00	66.71
		11	1507.25	104.38
231	35.41	1	50.99	16.22
		2	5183.37	1250.27

		3	12807.31	3318.11		
		4	12338.59	2631.26		
		5	6431.75	1098.83		
		6	2542.98	368.24		
		7	393.04	123.65		
		8	51.72	14.41		
		9	762.13	112.63		
		10	642.14	79.12		
		11	928.43	93.99		
		232	34.78	1	48.48	16.02
				2	5317.67	1319.17
3	13287.92			3475.98		
4	12944.27			2743.63		
5	6680.23			1154.56		
6	2687.56			371.80		
7	353.18			111.36		
8	41.06			11.16		
9	1415.86			105.55		
10	748.41			98.90		
11	1054.31			95.71		
233	35.63	1	90.61	28.58		
		2	6856.77	1698.67		
		3	17179.29	4462.12		
		4	16513.62	3517.74		
		5	8722.58	1497.25		
		6	3362.82	454.96		
		7	482.12	153.35		
		8	89.29	29.66		
		9	870.95	141.26		
		10	785.29	95.41		
		11	1218.61	120.59		
234	35.34	1	89.51	28.15		
		2	6399.67	1531.99		
		3	15412.32	4036.58		
		4	14982.21	3180.56		

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		5	7918.41	1359.43
		6	3109.73	439.83
		7	400.52	127.45
		8	52.79	17.44
		9	774.64	122.32
		10	844.34	113.17
		11	1033.65	117.26
235	35.95	1	60.47	19.29
		2	7425.37	1837.86
		3	18732.73	4866.36
		4	18155.50	3859.56
		5	9522.36	1637.64
		6	3818.34	506.67
		7	518.04	164.11
		8	71.47	22.84
		9	959.11	147.53
		10	987.45	122.63
		11	1372.71	139.21
236	36.79	1	142.09	44.33
		2	8884.27	2197.97
		3	22200.68	5812.88
		4	21427.46	4583.39
		5	11392.99	1966.54
		6	4482.08	608.32
		7	558.29	177.39
		8	53.25	17.71
		9	1163.62	173.59
		10	1219.71	139.26
		11	1562.53	159.89
237	34.57	1	130.14	40.53
		2	6800.27	1653.92
		3	16742.11	4340.31
		4	16149.60	3446.03
		5	8391.57	1448.33
		6	3221.87	443.34

Valor de las variables de salida para cada uno de los sistemas de producción de plasma

		7	459.36	145.57
		8	61.83	20.45
		9	812.88	122.96
		10	892.10	95.97
		11	1245.66	131.78
238	36.06	1	122.10	38.90
		2	7944.91	1930.34
		3	19321.28	5019.43
		4	18740.63	3991.69
		5	9756.08	1683.09
		6	3693.46	537.89
		7	474.84	151.69
		8	65.67	15.62
		9	1040.81	146.15
		10	963.37	118.69
		11	1336.01	140.13
239	36.11	1	124.15	39.67
		2	9023.89	2171.59
		3	21990.78	5713.99
		4	21293.54	4536.07
		5	11171.12	1929.27
		6	4490.79	616.10
		7	580.52	184.21
		8	88.50	26.77
		9	1025.27	159.82
		10	2534.64	129.94
		11	2531.72	155.71
240	36.76	1	140.25	44.16
		2	10271.08	2476.07
		3	25027.24	6503.59
		4	24157.40	5164.40
		5	12662.81	2188.50
		6	4831.92	679.16
		7	607.71	192.34
		8	65.34	21.47

		9	1167.06	183.30
		10	3070.20	137.81
		11	1787.05	173.36
241	37.67	1	166.44	52.82
		2	11593.33	2790.79
		3	27963.89	7318.08
		4	27119.90	5783.54
		5	14243.78	2457.09
		6	5338.80	763.31
		7	628.36	200.81
		8	81.81	26.20
		9	1420.06	201.72
		10	3459.12	175.88
		11	3459.12	194.94

**Apéndice II. Tabla III Variables de salida del sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**



# Apéndice III: Estudio estadístico de los sistemas.

El objetivo del estudio estadístico es estudiar las relaciones existentes entre los resultados obtenidos y las condiciones operativas del proceso con las diferentes sistemas utilizado para obtener el plasma. Se trata de estudiar independientemente cada uno de los sistemas utilizados:

- APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.
- APPC\_NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.
- APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.

## 1. Sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

Las condiciones operativas de este sistema vienen definidas por los valores de 4 variables:

- Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
- Voltaje.
- Frecuencia.
- Humedad inicial (Hum\_Ini).

Las características resultantes del proceso que se van a estudiar son:

- Intensidad.
- Humedad final (Hum\_Fin).
- Temperatura muestra (Temp\_mue).
- Temperatura cámara (Temp-cam).

- Espectro obtenido (definido por las alturas y áreas de los picos en 12 longitudes de onda determinadas).

La metodología empleada utilizada en el estudio está descrita en el punto 5.2 Metodología empleada en el análisis estadístico de datos de la presente tesis.

### 1.1. Intensidad

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la intensidad, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Intensidad.
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor de dieléctrico (Gros\_Di).
  - Voltaje (Voltaje).
  - Frecuencia (Frecuencia).
  - Humedad inicial (Hum\_Ini).

<i>.Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	-6.10762	2.24173	-2.72451	0.0095
<b>Gros_Di</b>	-29.7094	1.67314	-17.7567	0.0000
<b>Voltaje</b>	3.04831	0.136642	22.3088	0.0000
<b>Frecuencia</b>	21.441	1.29161	16.6002	0.0000

Apéndice III. Tabla 1 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la intensidad para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

R-cuadrada = 93.5074 por ciento.

Desviación típica residual = 2.2614.

La ecuación que nos da la intensidad prevista por el modelo es:

$$I = -6.10762 - 29.7094 \cdot e + 3.04831 \cdot V + 21.441 \cdot v$$

Siendo:

I= Intensidad.

e = Grosor dieléctrico.

V = Voltaje.

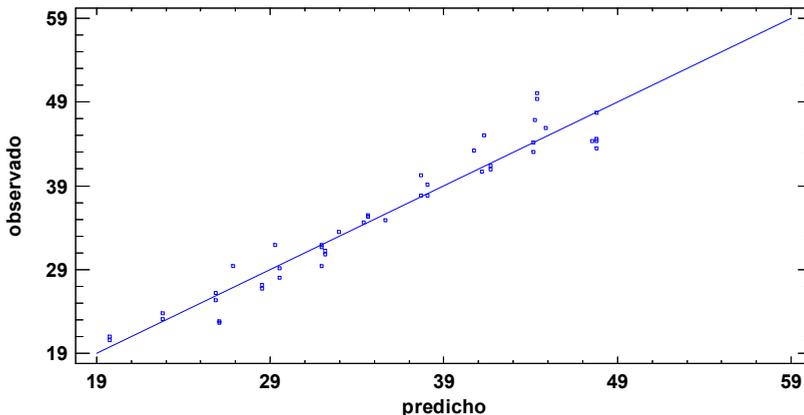
v = Frecuencia

Se constata una muy estrecha relación de la Intensidad resultante con el grosor del dieléctrico, el voltaje y la frecuencia, no resultando significativo el efecto de la humedad inicial.

De acuerdo con los signos obtenidos para los parámetros del modelo, la intensidad resultante aumenta al hacerlo el voltaje y la frecuencia y disminuye cuando aumenta el grosor del dieléctrico.

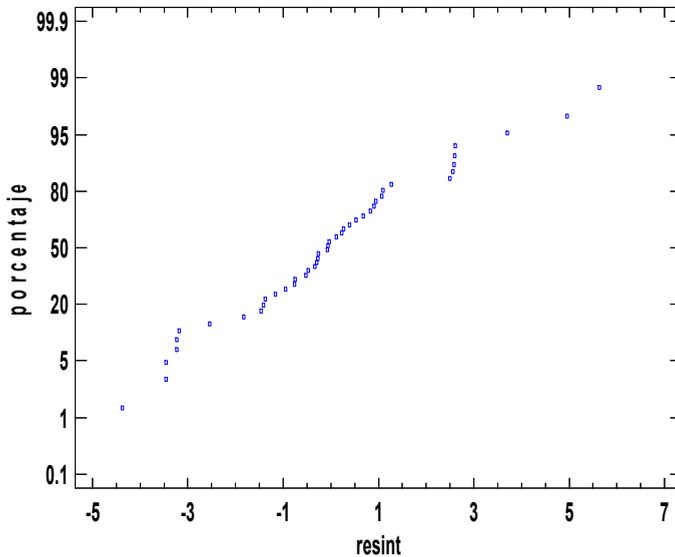
Como se ha señalado la relación obtenida es muy estrecha, pues el valor de 93.5% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para la intensidad por el modelo y el realmente obtenido es 0.967 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno  $0.935074^{1/2} = 0.967$ ). En la siguiente figura se constata la estrecha relación entre las intensidades previstas por el modelo y sus valores reales.

Gráfico de Intensidad



Apéndice III. Figura 1 Gráfico de Intensidad. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

Gráfico de Probabilidad Normal



Apéndice III. Figura 2 Gráfico de residuos variable independiente Intensidad para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

Por otra parte, la configuración claramente lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal (ver arriba) pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

**1.2. Humedad Final**

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la humedad final, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Humedad final (Hum\_Fin).
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
  - Voltaje (Voltaje).
  - Frecuencia (Frecuencia).
  - Humedad inicial (Hum\_Ini).

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	-3.23982	1.60902	-2.01353	0.0507
<b>Voltaje</b>	0.358633	0.104558	3.43	0.0014

<b>Hum_Ini</b>	0.96654	0.0161787	59.7414	0.0000
----------------	---------	-----------	---------	--------

**Apéndice III. Tabla 2. Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la humedad final para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

R-cuadrada = 98.8645 por ciento.

Desviación típica residual = 2.5543.

La ecuación que nos da la humedad final prevista por el modelo es:

$$H_f = -3.23982 + 0.358633 \cdot V + 0.96654 \cdot H_i$$

Siendo:

$H_f$  = Humedad Final.

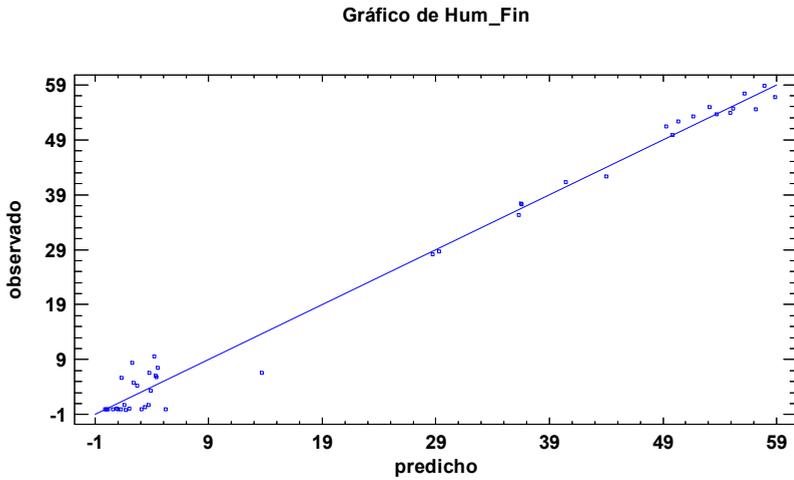
$V$  = Voltaje.

$H_i$  = Humedad Inicial.

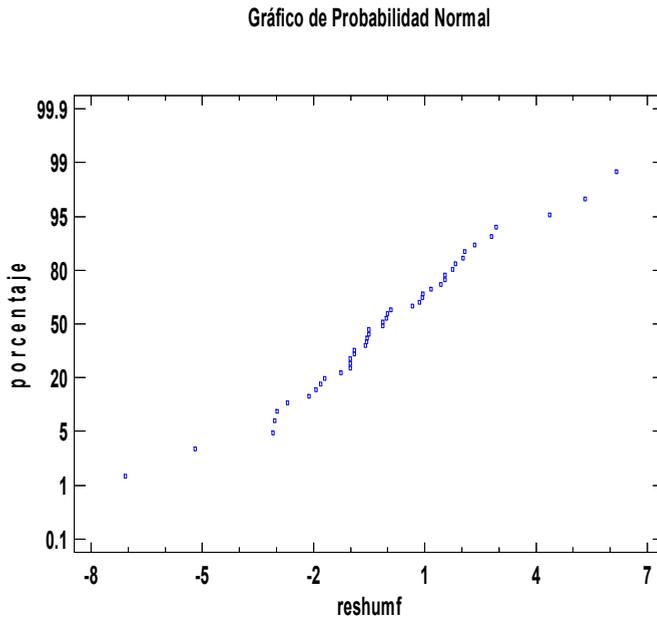
Se constata una relación también muy estrecha de la humedad final con el voltaje y sobre todo con la humedad inicial, no resultando significativos los efectos de la frecuencia ni del grosor del dieléctrico sobre dicha variable.

La humedad final resultante aumenta al hacerlo el voltaje y la humedad inicial.

Como se ha señalado la relación obtenida es muy estrecha, pues el valor de 98.86% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para la intensidad por el modelo y el realmente obtenido es 0.994 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno). En la siguiente figura se constata la estrecha relación entre las humedades finales previstas por el modelo y sus valores reales.



**Apéndice III. Figura 3 Gráfico de Humedad Final. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**



**Apéndice III. Figura 4. Gráfico de residuos variable independiente Humedad final para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Por otra parte, la configuración claramente lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal (ver arriba) pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

### 1.3. Temperatura de la muestra

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la muestra, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Temperatura de la muestra (Temp\_mue).
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
  - Voltaje (Voltaje).
  - Frecuencia (Frecuencia).
  - Humedad inicial (Hum\_Ini).

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	24.2368	0.726521	33.3601	0.0000
<b>Gros_Di</b>	2.07364	0.844353	2.45589	0.0184
<b>Voltaje</b>	0.116089	0.0661429	1.75512	0.0867

Apéndice III. Tabla 3 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la muestra para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

R-cuadrada = 40.2424 por ciento.

Desviación típica residual = 1.19215.

La ecuación que nos da la temperatura de la muestra prevista por el modelo es:

$$T_m = 24.2368 + 2.07364 \cdot e + 0.116089 \cdot V$$

Siendo:

$T_m$  = Temperatura de la muestra.

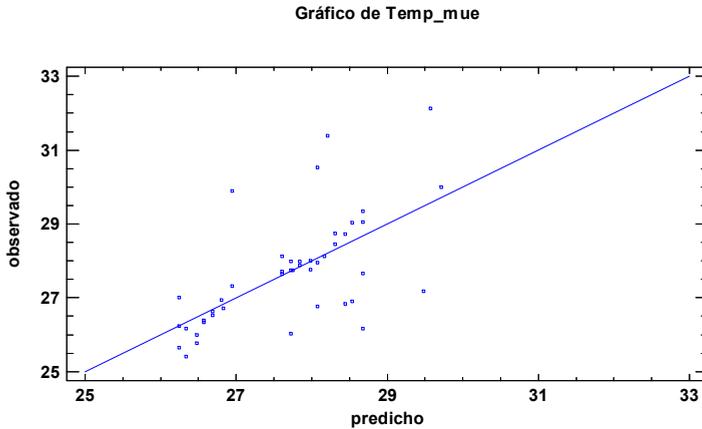
$e$  = Grosor dieléctrico.

$V$  = Voltaje.

Sólo el grosor del dieléctrico tiene una relación estadísticamente significativa con la temperatura de la muestra. Dicha relación es positiva, de forma que dicha temperatura aumenta en promedio al hacerlo el grosor del dieléctrico

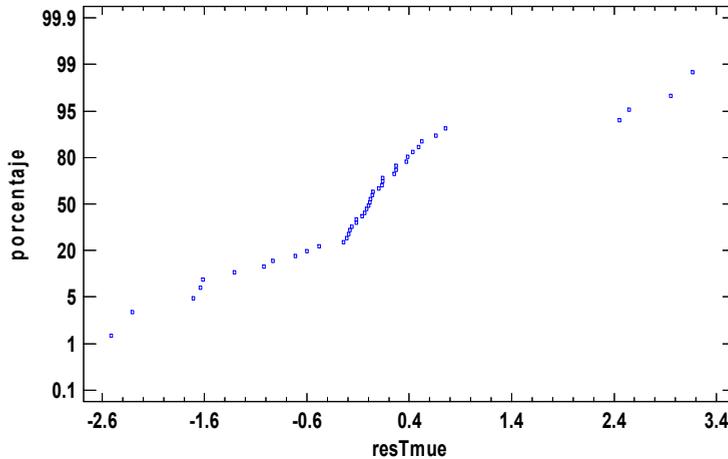
También parece existir un ligero efecto positivo del voltaje sobre la temperatura de la muestra, aunque este efecto es dudoso pues su p-value asociado es solo 0.087.

La relación obtenida no ha sido en este caso tan estrecha como la constatada en los dos anteriores, pues el valor de 40.2% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para la temperatura de la muestra por el modelo y el realmente obtenido es solo de 0.634 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno). En la siguiente figura se constata la relación entre las temperaturas de la muestra previstas por el modelo y sus valores reales.



**Apéndice III. Figura 5 Gráfico de Temperatura muestra. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Gráfico de Probabilidad Normal



Apéndice III. Figura 6 Gráfico de residuos variable independiente  
Temperatura muestra para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek  
modelo 10/10B-HS

Por otra parte, la configuración bastante lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal (ver arriba) pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

#### 1.4. Temperatura de la cámara

Los gráficos de dispersión realizados con carácter exploratorio antes de realizar el ajuste de regresión pusieron de manifiesto la posibilidad de efectos no lineales en algunas de las variables de proceso. En consecuencia al realizar el ajuste del modelo se incluyeron, entre las variables candidatas a entrar en el mismo, términos cuadráticos para algunas de dichas variables.

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la cámara, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Temperatura de la cámara (Temp\_cam).
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
  - Voltaje (Voltaje).
  - Frecuencia (Frecuencia).
  - Humedad inicial (Hum\_Ini).
  - Voltaje<sup>2</sup>.

○ Hum\_Ini^2

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	17.9833	2.71536	6.62279	0.0000
<b>Gros_Di</b>	1.60122	0.825313	1.94014	0.0598
<b>Voltaje</b>	1.01088	0.397684	2.54191	0.0152
<b>Hum_Ini</b>	-0.115852	0.0430587	-2.69055	0.0105
<b>Voltaje^2</b>	-0.031672	0.0132012	-2.39918	0.0214
<b>Hum_Ini^2</b>	0.00297647	0.000813843	3.6573	0.0008

**Apéndice III. Tabla 4. Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la cámara para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

R-cuadrada = 71.1185 por ciento.

Desviación típica residual = 1.08107.

La ecuación que nos da la temperatura de la cámara prevista por el modelo es:

$$T_c = 17.9833 + 1.60122 \cdot e + 1.01088 \cdot V - 0.115852 \cdot H_i - 0.031672 \cdot V^2 + 0.00297647 \cdot H_i^2$$

Siendo:

$T_c$  = Temperatura de la cámara.

$e$  = Grosor dieléctrico.

$V$  = Voltaje.

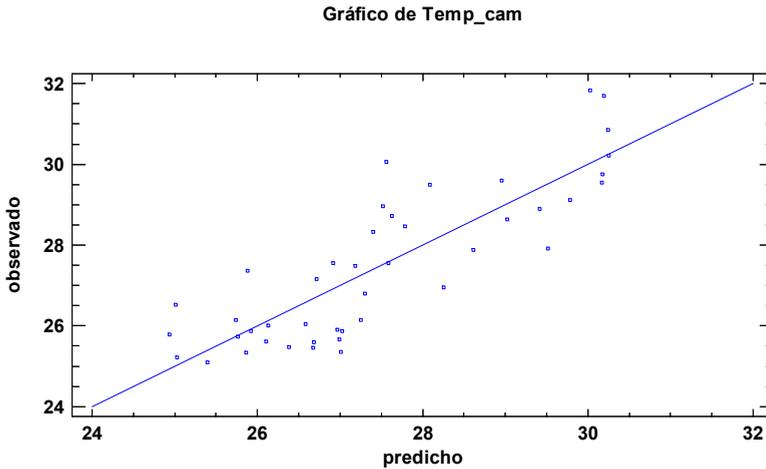
$H_i$  = Humedad inicial

El Grosor del Dieléctrico tiene un efecto positivo sobre la temperatura de cámara, aunque su significación estadística es dudosa (p-value=0.0598)

Se detecta también que la temperatura de cámara aumenta al hacerlo el Voltaje, aunque la curvatura negativa significativa detectada indica que este aumento es cada vez menos marcado a medida que se incrementan los valores del Voltaje.

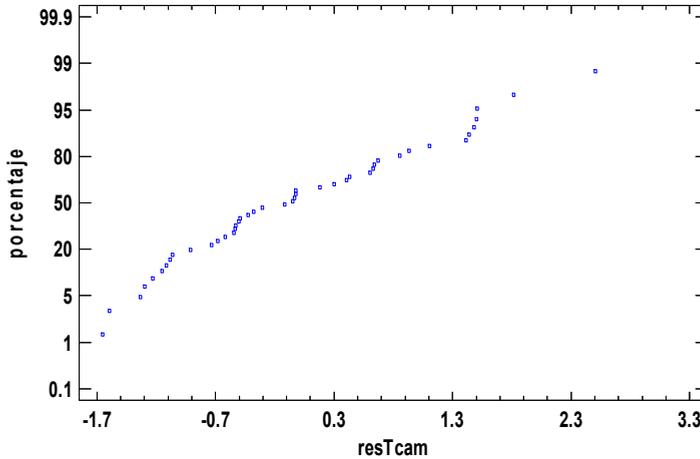
Para la Humedad Inicial se detecta la situación contraria. La temperatura de cámara disminuye al aumentar dicha humedad, pero la curvatura positiva significativa detectada indica que dicha disminución es menos marcada a medida que aumentan los valores de la humedad.

La relación obtenida ha sido en este caso mejor que la constatada para la temperatura de la muestra, pues el valor de 71.1% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para la temperatura de la cámara por el modelo y el realmente obtenido es 0.843 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno). En la siguiente figura se constata la relación entre las temperaturas de la cámara previstas por el modelo y sus valores reales.



**Apéndice III. Figura 7 Gráfico de Temperatura cámara. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Gráfico de Probabilidad Normal



Apéndice III. Figura 8 Gráfico de residuos variable independiente Temperatura cámara para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

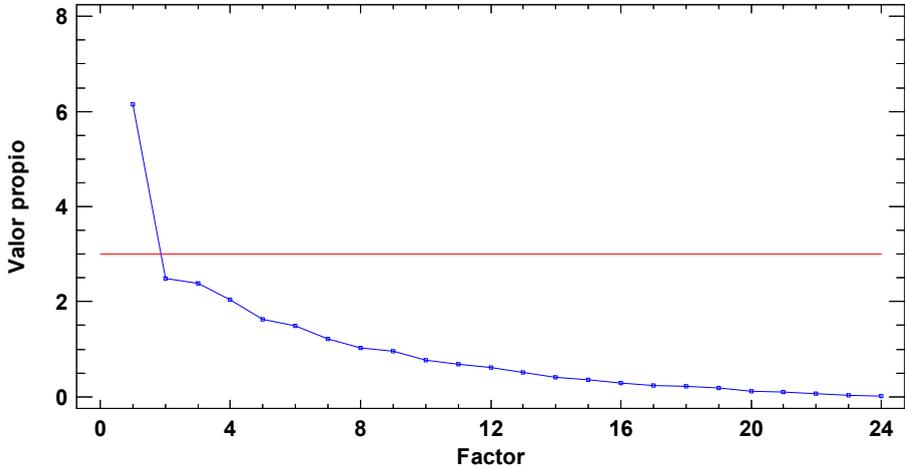
Por otra parte, la configuración claramente lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal (ver arriba) pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

## 1.5. Espectro

### 1.5.1. Resultados del Análisis Factorial de las variables del espectro

La siguiente figura recoge la varianza explicada por los diferentes factores obtenidos en el análisis (medida por el correspondiente valor propio) ordenados de forma decreciente. Debe de entenderse que los factores son un número reducido de entes subyacentes que explican la variabilidad observada en un número elevado de variables intercorrelacionadas. Se identifican a partir de sus correlaciones con las distintas variables.

**Varianzas explicadas por los factores**



**Apéndice III. Figura 9 Varianza explicada por los factores para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Se constata la presencia de un primer factor de importancia claramente superior a la de los restantes, a dicho factor lo vamos a denominar Factor A. El Factor A se define y explica a partir de sus correlaciones con las distintas variables.

Para analizar el significado del Factor A, en la siguiente tabla se recogen sus correlaciones con cada una de las 24 variables primitivas.

En la siguiente tabla se encuentra los Coeficientes de correlación del Factor A con las 24 variables primitivas.

	<b>Factor A</b>
<b>ALTURA1</b>	-0.671864
<b>ALTURA10</b>	-0.211752
<b>ALTURA11</b>	-0.149258
<b>ALTURA12</b>	-0.275442
<b>ALTURA2</b>	0.934023
<b>ALTURA3</b>	0.957157
<b>ALTURA4</b>	0.958628
<b>ALTURA5</b>	0.916317

<b>ALTURA6</b>	0.704293
<b>ALTURA7</b>	-0.0889304
<b>ALTURA8</b>	-0.434019
<b>ALTURA9</b>	0.12948
<b>AREA1</b>	-0.431083
<b>AREA10</b>	-0.295945
<b>AREA11</b>	-0.203673
<b>AREA12</b>	-0.154281
<b>AREA2</b>	-0.422136
<b>AREA3</b>	0.569001
<b>AREA4</b>	0.496868
<b>AREA5</b>	-0.0847771
<b>AREA6</b>	0.189668
<b>AREA7</b>	0.0378131
<b>AREA8</b>	-0.18331
<b>AREA9</b>	-0.353014

**Apéndice III. Tabla 5 Los Coeficientes de correlación del Factor A con las 24 variables primitivas del espectro para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Se constata que el Factor A está fuertemente correlacionado de forma positiva con las alturas de los picos 2, 3, 4, 5 y 6, y correlacionado negativamente con las de los picos 1 y, en menor grado 8.

Las correlaciones con las variables correspondientes a áreas son menos marcadas, siendo las más importantes entre las positivas las relativas a los picos 3 y 4, y entre las negativas las de los picos 1 y 2.

En consecuencia los ensayos con valores positivos altos del Factor A corresponden a espectros con valores altos de las alturas de los picos 2 a 6 y relativamente bajos de los picos 1 y 8<sup>1</sup>, siendo también relativamente altas las áreas de los picos 3 y 4, y bajas las de los picos 1 y 2<sup>2</sup>

En los ensayos correspondientes a valores muy negativos del Factor A se produciría la citación contraria, con valores bajos de las alturas de los

<sup>1</sup> En estas frases valores “altos” de una variable se refiere a valores claramente superiores a su valor promedio, mientras que valores “bajos” se refiere a valores claramente inferiores a su valor promedio

<sup>2</sup> La coincidencia en los ensayos con valores positivos del Factor A de valores altos de la altura y bajos del área del pico 2, implicaría que dichos picos son altos y estrechos.

picos 2 a 6 y de las áreas de los picos 3 y 4, y valores relativamente altos de los picos 1 y 8 y de las áreas de los picos 1 y 2.

### 1.5.2. Relación del factor del espectro con las condiciones operativas

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente el valor en cada ensayo el valor del Factor A asociado al espectro, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Factor A.
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del dieléctrico(Gros\_Di).
  - Voltaje (Voltaje).
  - Frecuencia (Frecuencia).
  - Humedad Inicial (Hum\_Ini).

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	-16.1957	2.37839	-6.80955	0.0000
<b>Gros_Di</b>	-17.612	1.76012	-10.0061	0.0000
<b>Voltaje</b>	1.95734	0.143944	13.5979	0.0000
<b>Frecuencia</b>	3.76682	1.35903	2.7717	0.0085
<b>Hum_Ini</b>	-0.0543449	0.0150952	-3.60014	0.0009

Apéndice III Tabla 6 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente Factor A para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

R-cuadrada = 84.6672 por ciento.

Desviación típica residual = 2.37702.

La ecuación que nos da el valor del Factor A previsto por el modelo es:

$$F_A = -16.1957 - 17.612 \cdot e + 1.95734 \cdot V + 3.76682 \cdot v - 0.0543449 \cdot H_i$$

Siendo:

$F_A$  = Factor A.

$e$  = Grosor dieléctrico.

$V$  = Voltaje.

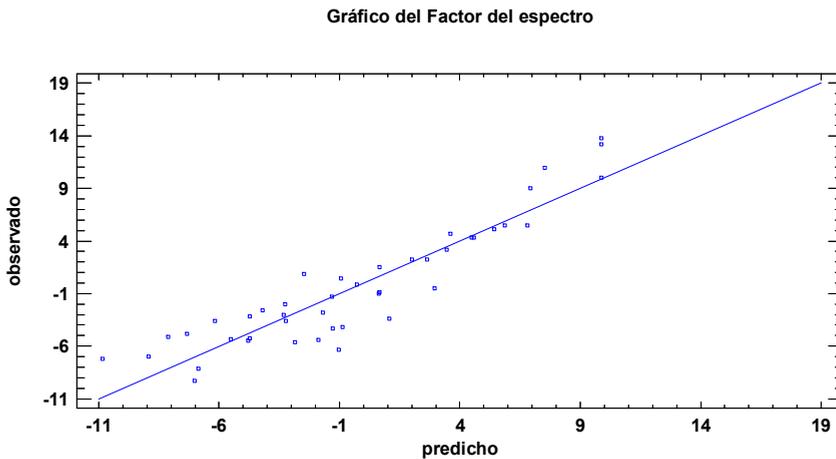
$v$  = Frecuencia.

$H_i$  = Humedad inicial

Las cuatro variables del proceso tienen un efecto estadísticamente muy significativo sobre el Factor A asociado al espectro.

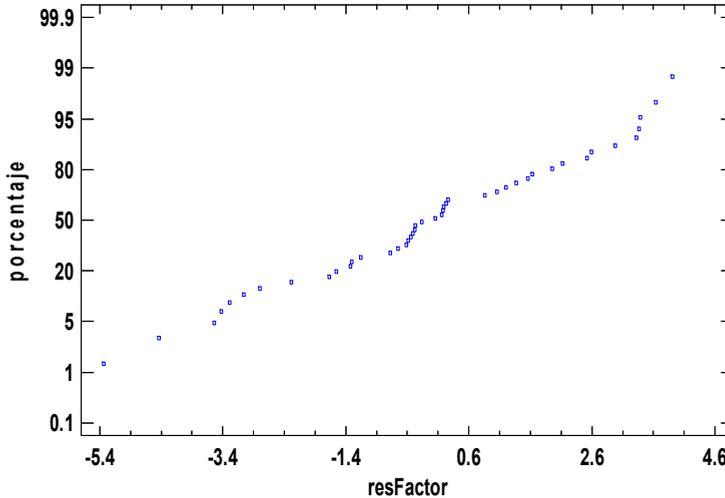
De los signos obtenidos para los coeficientes del modelo se deduce que el valor del Factor A aumenta al hacerlo el voltaje y la frecuencia, mientras que disminuye cuando aumentan el grosor del dieléctrico y la humedad inicial. Al final del punto “Resultados del Análisis Factorial de las variables del espectro” se ha explicado lo que implican estos aumentos o disminuciones del valor del Factor A respecto a las características del espectro.

La relación obtenida es muy estrecha, pues el valor de 84.67% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para el Factor A por el modelo y el realmente obtenido es 0.92 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno. En la siguiente figura se constata la estrecha relación entre los valores previstos por el modelo para el Factor A y sus valores reales.



**Apéndice III. Figura 10 Gráfico del Factor A del espectro. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Gráfico de Probabilidad Normal



**Apéndice III. Figura 11 Gráfico de residuos variable independiente Factor A del espectro para el sistema APPC-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Por otra parte, la configuración claramente lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

## 2. Sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

Las condiciones operativas de este sistema vienen definidas por los valores de 4 variables:

- Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
- Voltaje.
- Frecuencia.
- Humedad inicial (Hum\_Ini).

Las características resultantes del proceso que se van a estudiar son:

- Humedad final (Hum\_Fin).
- Temperatura muestra (Temp\_mue).
- Temperatura cámara (Temp-cam).
- Espectro obtenido (definido por las alturas y áreas de los picos en 11 longitudes de onda determinadas).

La metodología empleada utilizada en el estudio está descrita en el punto 5.2 Metodología empleada en el análisis estadístico de datos de la presente tesis.

### 2.1. Humedad Final

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la humedad final, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Humedad final (Hum\_Fin).
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
  - Voltaje.
  - Frecuencia.
  - Humedad Inicial (Hum\_Ini).

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	2.42055	0.616796	3.92439	0.0005
<b>Hum_Ini</b>	0.955983	0.0169581	56.3733	0.0000

Apéndice III. Tabla 7 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la humedad final para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

R-cuadrada = 99.1266 porciento.

Desviación típica residual = 2.47337.

La ecuación que nos da la humedad final prevista por el modelo es:

$$H_f = 2.42055 + 0.955983 \cdot H_i$$

Siendo:

$H_f$  = Humedad Final.

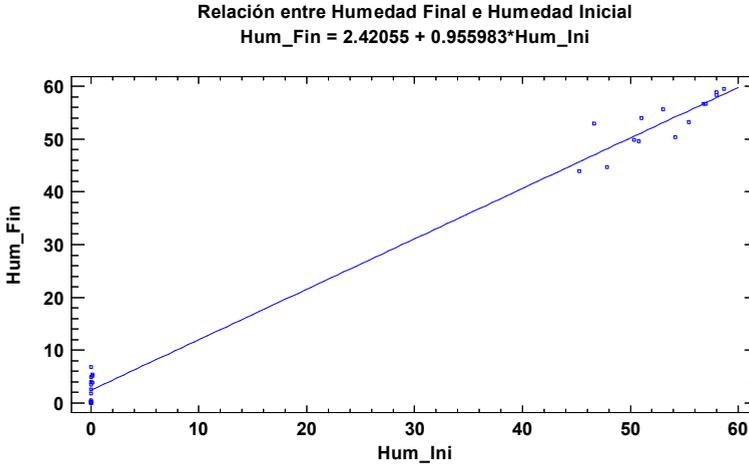
$H_i$  = Humedad Inicial.

Se constata una relación muy estrecha de la humedad final con la humedad inicial, no resultando significativos los efectos de ninguna de las otras tres variables del proceso.

La humedad final aumenta prácticamente en un punto porcentual por cada aumento de un punto de la humedad inicial.

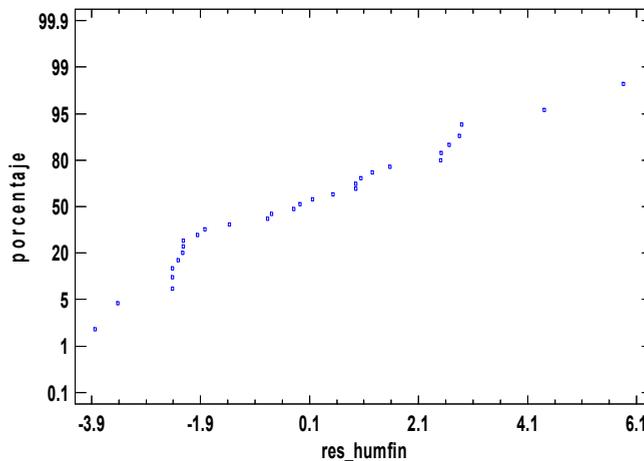
La relación obtenida es muy estrecha, pues el valor de 99.13% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación lineal de 0.996 (que es la raíz

cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno) entre la humedad final y la humedad inicial En el siguiente diagrama de dispersión se constata la estrecha relación entre ambas humedades.



**Apéndice III. Figura 12 Gráfico de Humedad Final. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

**Gráfico de Probabilidad Normal**



**Apéndice III. Figura 13 Gráfico de residuos variable independiente Humedad final para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

Por otra parte, la configuración bastante lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal (ver arriba) pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

La relación obtenida ha resultado bastante parecida a la encontrada para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS, en la que también era la humedad inicial la variable que más influía sobre la humedad final, siendo el coeficiente correspondiente de la ecuación de regresión 0.967, casi igual al valor 0.956 hallado en este caso.

En el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-H, sin embargo también se encontró un efecto significativo positivo para el voltaje.

Si se fuerza en este caso a que la variable voltaje entre en el modelo se constata, tal como se ve a continuación, un efecto también positivo, pero que no resulta significativo estadísticamente.

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	1.39016	1.73173	0.802755	0.4291
<b>Voltaje</b>	0.0758552	0.118939	0.637767	0.5290
<b>Hum_Ini</b>	0.957778	0.0173702	55.1392	0.0000

Apéndice III. Tabla 8 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la humedad final añadiendo el Voltaje para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

La ecuación que nos da la humedad final prevista por el modelo es:

$$H_f = 1.39016 + 0.0758552 \cdot V + 0.957778 \cdot H_i$$

Siendo:

$H_f$  = Humedad Final.

$V$  = Voltaje.

$H_i$  = Humedad Inicial.

## 2.2. Temperatura de la muestra

Los gráficos de dispersión realizados con carácter exploratorio antes de realizar el ajuste de regresión pusieron de manifiesto la posibilidad de efectos no lineales en algunas de las variables de proceso. En consecuencia al realizar el ajuste del modelo se incluyeron, entre las variables candidatas a entrar en el mismo, términos cuadráticos para algunas de dichas variables.

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la muestra, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Temperatura muestra (Temp\_mue).
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
  - Voltaje
  - Frecuencia
  - Humedad inicial (Hum\_Ini).
  - Hum\_Ini<sup>2</sup>
  - Frecuencia<sup>2</sup>

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	24.6635	0.70213	35.1267	0.0000
<b>Gros_Di</b>	2.21402	0.948129	2.33515	0.0282
<b>Voltaje</b>	0.421232	0.0801565	5.25511	0.0000
<b>Frecuencia</b>	-0.47162	0.141708	-3.32811	0.0028
<b>Hum_Ini</b>	-0.159464	0.0589877	-2.70335	0.0124
<b>Hum_Ini<sup>2</sup></b>	0.00288982	0.00109594	2.63683	0.0144

Apéndice III. Tabla 9 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la muestra para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

R-cuadrada = 72.7199 por ciento.

Desviación típica residual = 0.759579.

La ecuación que nos da la temperatura de la muestra prevista por el modelo es:

$$T_m = 24.6635 + 2.21402 \cdot e + 0.421232 \cdot V - 0.47162 \cdot v - 0.159464 \cdot H_i + 0.00288982 \cdot H_i^2$$

Siendo:

$T_m$  = Temperatura de la muestra.

$e$  = Grosor dieléctrico.

$V$  = Voltaje.

$v$  = Frecuencia.

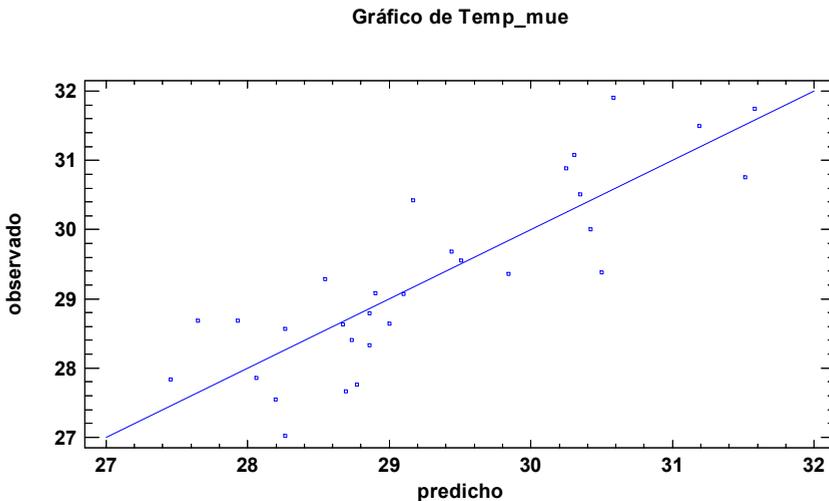
$H_i$  = Humedad inicial.

El voltaje y el Grosor del Dieléctrico tienen efectos significativos positivos sobre la temperatura de la muestra. Este resultado es similar al que se obtuvo para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-H.

También se ha detectado un efecto significativo negativo de la frecuencia y de la Humedad Inicial sobre la temperatura de la muestra, de forma que la temperatura disminuye al aumentar dichas variables. En el segundo caso, la curvatura positiva detectada indica que dicha disminución es menos marcada a medida que aumentan los valores de la humedad.

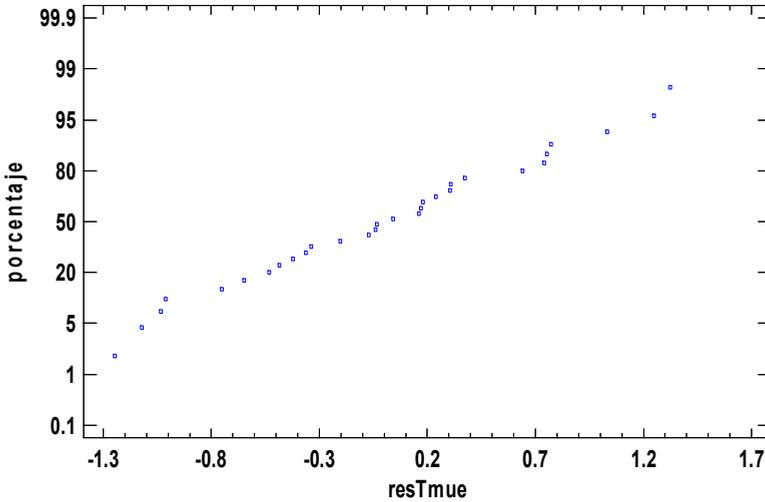
La relación obtenida ha sido en este caso bastante buena, pues el valor de 72.7%% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para la temperatura de la muestra por el modelo y el realmente obtenido es 0.853 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno).

En la siguiente figura se constata la relación entre las temperaturas de la muestra previstas por el modelo y sus valores reales.



**Apéndice III. Figura 14 Gráfico de Temperatura muestra. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

Gráfico de Probabilidad Normal



Apéndice III. Figura 15 Gráfico de residuos variable independiente Temperatura muestra para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

### 2.3. Temperatura de la cámara

Los gráficos de dispersión realizados con carácter exploratorio antes de realizar el ajuste de regresión pusieron de manifiesto la posibilidad de efectos no lineales en algunas de las variables de proceso. En consecuencia al realizar el ajuste del modelo se incluyeron, entre las variables candidatas a entrar en el mismo, términos cuadráticos para algunas de dichas variables.

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la cámara, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Temperatura de la cámara (Temp\_cam).
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
  - Voltaje
  - Frecuencia
  - Humedad inicial (Hum\_Ini).
  - Frecuencia<sup>2</sup>

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	33.9417	2.12651	15.9612	0.0000
<b>Gros_Di</b>	-6.99887	2.25185	-3.10806	0.0048
<b>Voltaje</b>	0.694883	0.216686	3.20686	0.0038
<b>Frecuencia</b>	-2.3563	0.75163	-3.13493	0.0045
<b>Hum_Ini</b>	0.0491288	0.0143117	3.43278	0.0022
<b>Frecuencia^2</b>	0.191457	0.0619352	3.09125	0.0050

**Apéndice III Tabla 10 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la cámara para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

R-cuadrada = 66.5072 por ciento.

Desviación típica residual = 2.03041.

La ecuación que nos da la temperatura de la cámara prevista por el modelo es:

$$T_c = 33.9417 - 6.99887 \cdot e + 0.694883 \cdot V - 2.3563 \cdot v + 0.0491288 \cdot H_i + 0.191457 \cdot v_i^2$$

Siendo:

$T_c$  = Temperatura de la cámara.

$e$  = Grosor dieléctrico.

$V$  = Voltaje.

$v$  = Frecuencia.

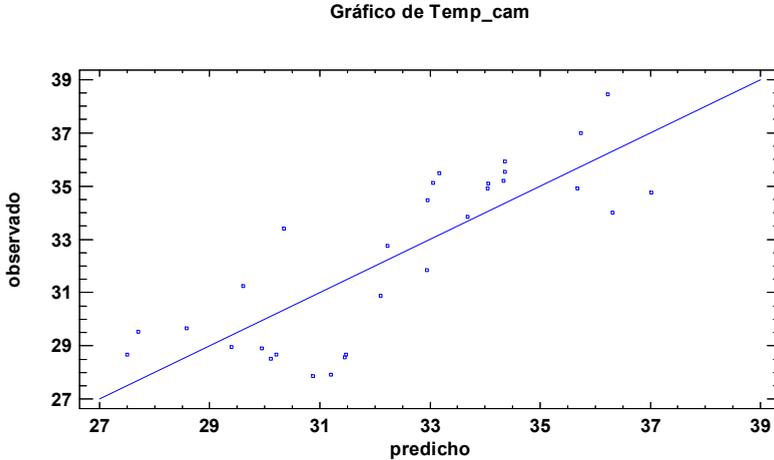
$H_i$  = Humedad inicial.

Las cuatro variables del proceso tienen efectos significativos sobre la temperatura de cámara. Dichos efectos son positivos para el Voltaje y la Humedad Inicial, y negativo en el caso del Grosor del Dieléctrico.

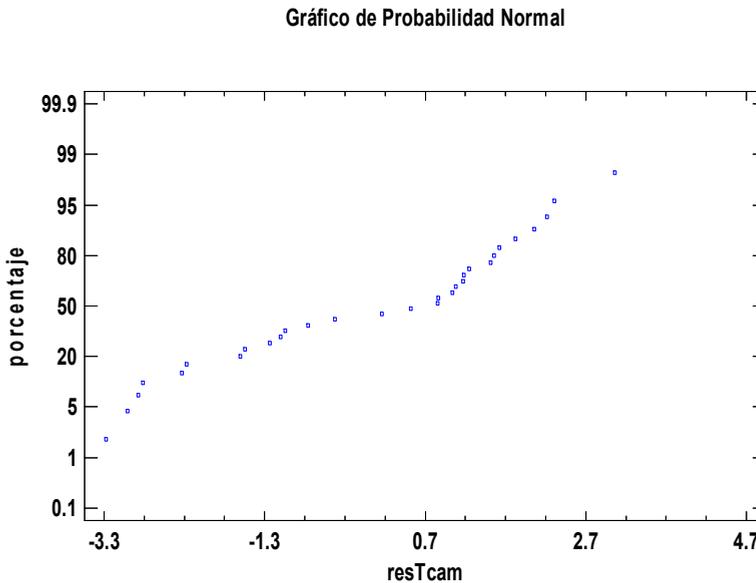
La relación de la temperatura de cámara con la Frecuencia presenta una curvatura positiva marcada, de forma que la temperatura es mínima para frecuencias del orden de 6, aumentando para valores más bajos o más altos de esta variable.

El coeficiente de correlación entre el valor previsto para la temperatura de la muestra por el modelo y el realmente obtenido es 0.815 (que es la raíz

cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno). En la siguiente figura se constata la relación entre las temperaturas de la cámara previstas por el modelo y sus valores reales.



**Apéndice III. Figura 16 Gráfico de Temperatura de la cámara. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**



**Apéndice III. Figura 17 Gráfico de residuos variable independiente Temperatura de la cámara para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

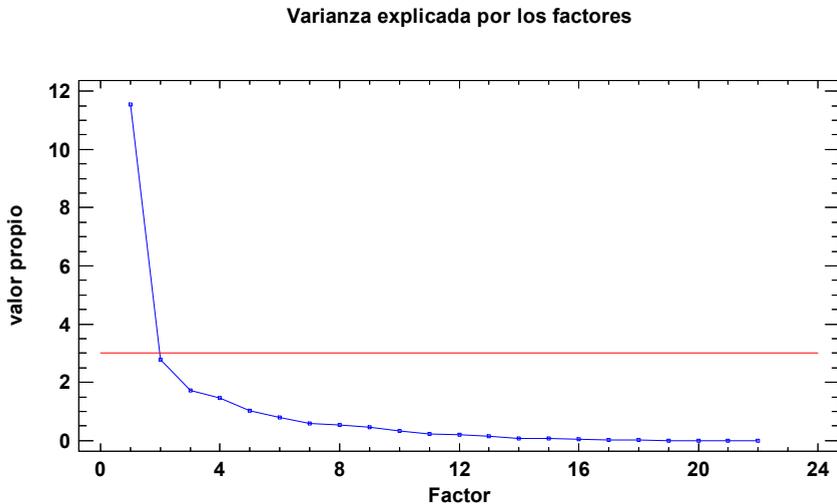
Por otra parte, la configuración lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal (ver arriba) pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

Los resultados obtenidos en este caso han sido sensiblemente diferentes a los hallados para la para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS, donde aunque también se encontró una relación positiva de la temperatura de la cámara con la humedad inicial, la relación hallada con el grosor del dieléctrico fue positiva, en vez de negativa, no siendo significativo el efecto del voltaje.

## 2.4. Espectro

### 2.4.1. Resultados del Análisis Factorial de las variables del espectro

La siguiente figura recoge la varianza explicada por los diferentes factores obtenidos en el análisis (medida por el correspondiente valor propio) ordenados de forma decreciente. Debe de entenderse que los factores son un número reducido de entes subyacentes que explican la variabilidad observada en un número elevado de variables intercorrelacionadas. Se identifican a partir de sus correlaciones con las distintas variables.



Apéndice III. Figura 18 Varianza explicada por los factores para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

Se constata la presencia de un primer factor de importancia claramente superior a la de los restantes, a dicho factor lo vamos a denominar Factor A. El Factor A se define y explica a partir de sus correlaciones con las distintas variables.

Para analizar el significado del Factor A, en la siguiente tabla se recogen sus correlaciones con cada una de las 22 variables primitivas.

En la siguiente tabla se encuentra los Coeficientes de correlación del Factor A con las 22 variables primitivas.

	<i>Factor A</i>
<b>ALTURA1</b>	-0.666102
<b>ALTURA10</b>	0.574968
<b>ALTURA11</b>	0.715202
<b>ALTURA2</b>	0.983934
<b>ALTURA3</b>	0.985052
<b>ALTURA4</b>	0.984754
<b>ALTURA5</b>	0.987104
<b>ALTURA6</b>	0.984344
<b>ALTURA7</b>	0.915893
<b>ALTURA8</b>	0.0898352
<b>ALTURA9</b>	0.690799
<b>AREA1</b>	-0.458305
<b>AREA10</b>	-0.40299
<b>AREA11</b>	-0.219501
<b>AREA2</b>	0.72953
<b>AREA3</b>	0.970654
<b>AREA4</b>	0.964158
<b>AREA5</b>	0.776344
<b>AREA6</b>	0.123737
<b>AREA7</b>	-0.53952
<b>AREA8</b>	-0.412423
<b>AREA9</b>	-0.418296

**Apéndice III. Tabla 11 Los Coeficientes de correlación del Factor A con las 24 variables primitivas del espectro para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4**

Se constata que el Factor A está fuertemente correlacionado de forma positiva con las alturas de los picos 2, 3, 4, 5, 6 y 7, y correlacionado negativamente con la del pico 1.

En cuanto a las correlaciones con las áreas las más importantes entre las positivas son relativas a los picos 3, y 4, en menor grado, las de los picos 2 y 5.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS se comprueba que el Factor A obtenido es muy similar al hallado en aquel caso, donde también se caracterizaba por elevadas correlaciones positivas con las alturas de los picos 2 a 6 y negativa con la del pico 1.

En consecuencia los ensayos con valores positivos altos del Factor A corresponden a espectros con valores altos de las alturas de los picos 2 a 7 y relativamente bajos del picos 1, siendo también relativamente altas las áreas de los picos 3 y 4, y bajas las de los picos 2 a 5, produciéndose la situación contraria e los ensayos correspondientes a valores muy negativos del Factor A.

#### 2.4.2. Relación del factor del espectro con las condiciones operativas

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente el valor en cada ensayo el valor del factor asociado al espectro, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Factor A (Puntuación de Factores)
- Variables independientes:
  - Grosor del dieléctrico (Gros\_Di).
  - Voltaje
  - Frecuencia
  - Humedad inicial (Hum\_Ini).

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	-20.5518	5.12183	-4.01259	0.0005
<b>Gros_Di</b>	-19.6665	6.90313	-2.84893	0.0085
<b>Voltaje</b>	1.84228	0.685037	2.68932	0.0123

<b>Frecuencia</b>	2.36051	1.19796	1.97044	0.0595
-------------------	---------	---------	---------	--------

**Apéndice III. Tabla 12 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente Factor A para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4**

R-cuadrada = 71.496 por ciento.

Desviación típica residual = 6.50696.

La ecuación que nos da el Factor A previsto por el modelo es:

$$F_A = -20.5518 - 19.6665 \cdot e + 1.84228 \cdot V + 2.36051 \cdot \nu$$

Siendo:

$F_A$  = Factor A.

e = Grosor dieléctrico.

V = Voltaje.

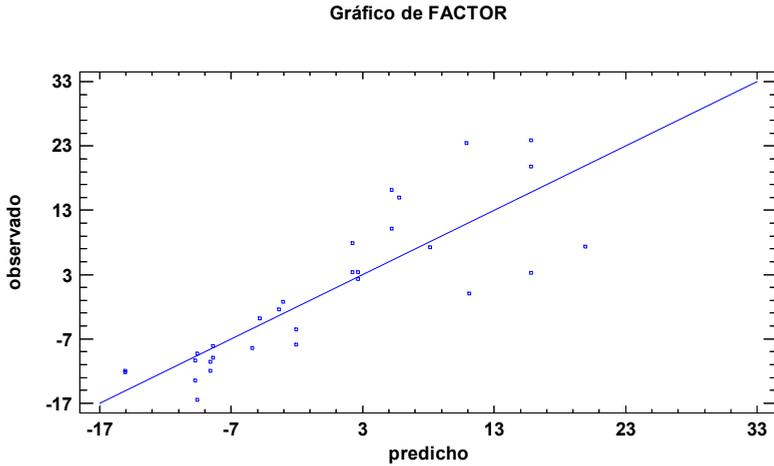
$\nu$  = Frecuencia.

El grosor del dieléctrico y el voltaje tienen un efecto claramente significativo, negativo en el primer caso y positivo en el segundo, sobre el valor del Factor A del espectro. La frecuencia tiene también un efecto positivo, aunque su nivel de significación estadística (p-value:0.0595) no es tan evidente. No se ha detectado en este caso un efecto significativo de la humedad inicial.

De los signos obtenidos para los coeficientes del modelo se deduce que el valor del Factor A aumenta al hacerlo el voltaje y la frecuencia, mientras que disminuye cuando aumentan el grosor del dieléctrico. Al final del apartado anterior se ha explicado lo que implican estos aumentos o disminuciones del valor del Factor A respecto a las características del espectro.

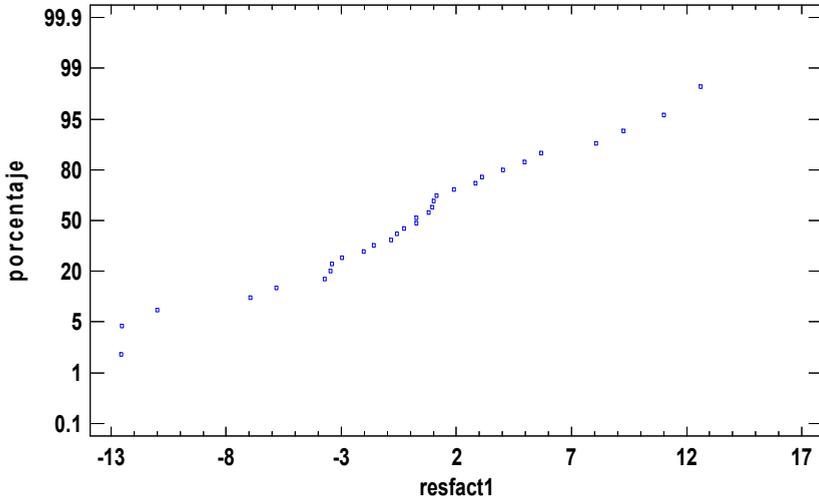
La relación obtenida entre los valores del Factor A y las variables operativas ha sido muy similar a la encontrada al estudiar la para el sistema APPC-NTP con el amplificador Trek modelo 10/10B-HS, donde también se constató una relación negativa muy significativa con el grosor del dieléctrico y relaciones positivas con el voltaje y la frecuencia, si bien en aquel caso también resultó significativa la relación con la humedad inicial.

La relación obtenida es bastante estrecha, pues el valor de 71.5% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para el Factor A por el modelo y el realmente obtenido es 0.846 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno). En la siguiente figura se constata la relación entre los valores previstos por el modelo para el Factor A y sus valores reales.



**Apéndice III. Figura 19 Gráfico del Factor A del espectro. Valor observado y valor predicho para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.**

Gráfico de Probabilidad Normal



Apéndice III. Figura 20 Gráfico de residuos variable independiente Factor A del espectro para el sistema APPC-NTP con amplificador GBS elektronik modelo Minipuls 4.

Por otra parte, la configuración claramente lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

### 3. Sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

Las condiciones operativas de este sistema vienen definidas por los valores de 5 variables:

- Grosor del electrodo (Gros\_elec).
- Voltaje .
- Frecuencia.
- Humedad.
- Caudal del aire.

Las características resultantes del proceso que se van a estudiar son:

- Intensidad.
- Temperatura muestra (Temp\_mue).
- Espectro obtenido (definido por las alturas y áreas de los picos en 11 longitudes de onda determinadas).

Se han realizado 239 ensayos.

La metodología empleada utilizada en el estudio está descrita en el punto 5.2 Metodología empleada en el análisis estadístico de datos de la presente tesis.

### 3.1. Intensidad

Antes de realizar el ajuste de regresión se construyeron los diagramas de dispersión de la Intensidad frente a las cinco variables operativas del proceso. Dichos gráficos pusieron de manifiesto la posibilidad de efectos no lineales en algunas de dichas variables. En consecuencia al realizar el ajuste del modelo mediante regresión stepwise se incluyeron entre las variables candidatas a entrar en el modelo términos cuadráticos para algunas de dichas variables.

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise” han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Intensidad
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del electrodo (Gros\_Elec).
  - Voltaje.
  - Frecuencia.
  - Humedad.
  - Caudal.
  - Voltaje<sup>2</sup>.
  - Frecuencia<sup>2</sup>.

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	-94.401	4.45347	-21.1972	0.0000
<b>Gros_Elec</b>	2.78766	0.273645	10.1871	0.0000
<b>Voltaje</b>	7.33243	0.417219	17.5746	0.0000
<b>Frecuencia</b>	13.1166	0.427505	30.6818	0.0000
<b>Voltaje<sup>2</sup></b>	-0.167454	0.014167	-11.82	0.0000
<b>Frecuencia<sup>2</sup></b>	-0.814855	0.0484931	-16.8035	0.0000

Apéndice III. Tabla 13 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la intensidad de la cámara para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

R-cuadrada = 91.8088 por ciento.

Desviación típica residual = 2.18035.

La ecuación que nos da la intensidad prevista por el modelo es:

$$I = -94.401 + 2.78766 \cdot d + 7.33243 \cdot V + 13.1166 \cdot v - 0.167454 \cdot V^2 - 0.814855 \cdot v^2$$

Siendo:

I= Intensidad.

d = Diámetro del electrodo de potencia.

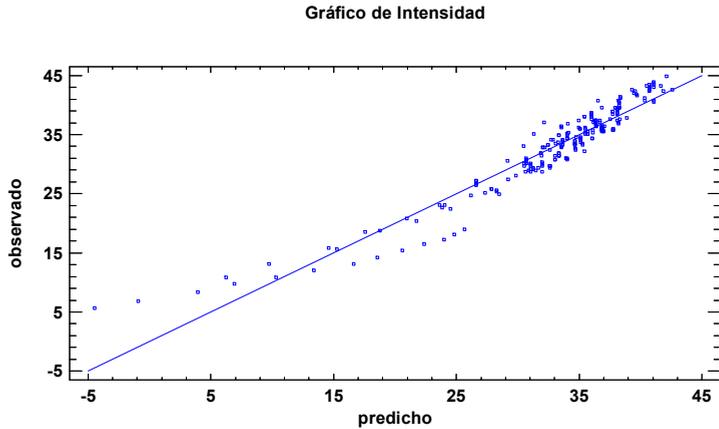
V = Voltaje.

v = Frecuencia.

Se constata una muy estrecha relación de la Intensidad resultante con el grosor del electrodo, el voltaje y la frecuencia, no resultando significativo el efecto de la Humedad ni el del Caudal.

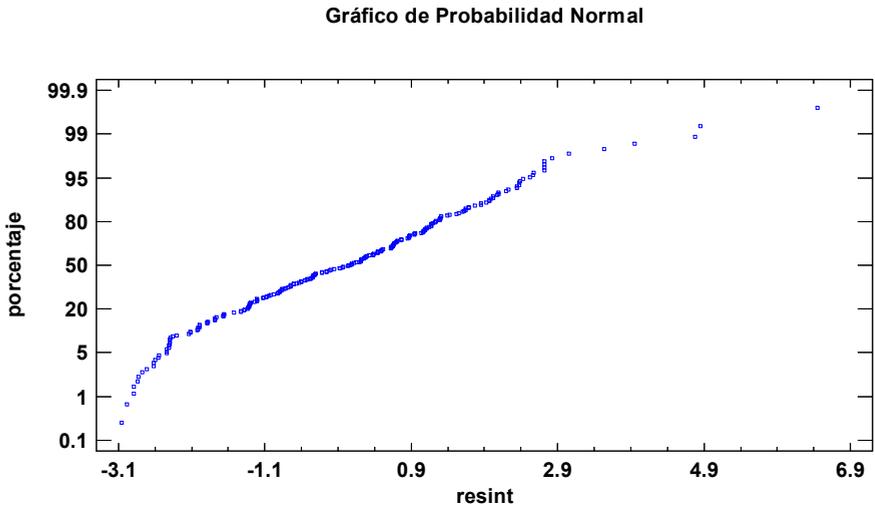
De acuerdo con los signos obtenidos para los parámetros del modelo, la intensidad resultante aumenta al hacerlo el grosor del electrodo. Tanto en el caso del Voltaje como en el de la Frecuencia la Intensidad se acrecienta al hacerlo dichas variables, pero la curvatura negativa detectada indica que en ambos casos dicho aumento es cada vez menos marcado a medida que se incrementan los valores de las mismas.

La relación obtenida es muy estrecha, pues el valor de 91.8% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para la intensidad por el modelo y el realmente obtenido es 0.958 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno). En la siguiente figura se constata la estrecha relación entre las intensidades previstas por el modelo y sus valores reales.



**Apéndice III Figura 21 Gráfico de Intensidad. Valor observado y valor predicho para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Se comprueba que los resultados reales coinciden bien con los previstos por el modelo, excepto quizás para intensidades bajas (inferiores a 20) en los que los valores reales son superiores a dichas predicciones.



**Apéndice III Figura 22 Gráfico de residuos variable independiente Intensidad para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Por otra parte, la configuración lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal (ver arriba) pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

### 3.2. Temperatura de la muestra

También para la temperatura de la muestra los gráficos exploratorios previos sugirieron la posibilidad de efectos no lineales para algunas de las variables operativas. En consecuencia al realizar el ajuste del modelo se incluyeron entre las variables candidatas a entrar en el modelo términos cuadráticos para algunas de dichas variables.

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la temperatura de la muestra, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Temp\_mue.
- Variables independientes candidatas:
  - Grosor del electrodo (Gros\_Elec).
  - Voltaje.
  - Frecuencia.
  - Humedad.
  - Caudal.
  - Gros\_Elec<sup>2</sup>.
  - Voltaje<sup>2</sup>.
  - Frecuencia<sup>2</sup>.
  -

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	640.665	29.4937	21.7221	0.0000
<b>Gros_Elec</b>	-130.258	6.14833	-21.186	0.0000
<b>Voltaje</b>	1.01598	0.219412	4.63047	0.0000
<b>Humedad</b>	0.00792515	0.00345467	2.29404	0.0227
<b>Caudal</b>	-0.113522	0.0149052	-7.61626	0.0000
<b>Gros_Elec<sup>2</sup></b>	6.85782	0.321844	21.3079	0.0000
<b>Voltaje<sup>2</sup></b>	-0.0240886	0.00770392	-3.1268	0.0020

Apéndice III. Tabla 14 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente la Temperatura muestra de la cámara para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS

R-cuadrada = 77.1966 por ciento.

Desviación típica residual = 1.40875.

La ecuación que nos da la temperatura de la muestra prevista por el modelo es:

$$T_m = 640.665 - 130.258 \cdot d + 1.01598 \cdot V + 0.00792515 \cdot H - 0.113522 \cdot C + 6.85782 \cdot d^2 - 0.0240886 \cdot V^2$$

Siendo:

$T_m$  = Temperatura de la muestra.

$d$  = Diámetro o grosor del electrodo de potencia.

$V$  = Voltaje.

$H$  = Humedad el aire cero.

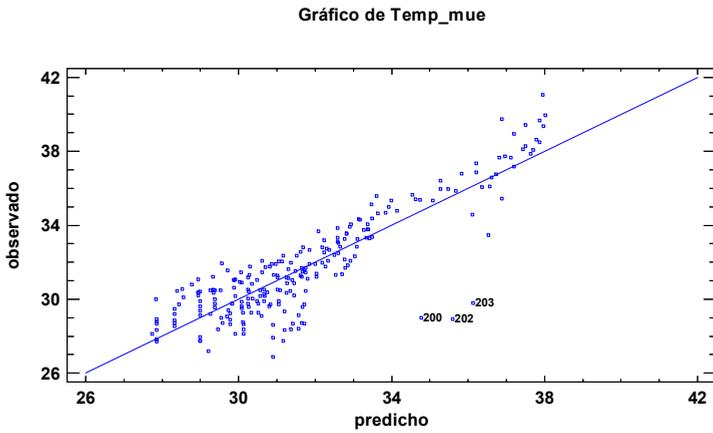
$C$  = Caudal de aire cero.

Se constata una relación estadísticamente significativa y positiva con el voltaje, aunque la curvatura negativa de dicha relación indica que el aumento de la temperatura al aumentar el voltaje es cada vez menos marcado a medida que se incrementan los valores de éste.

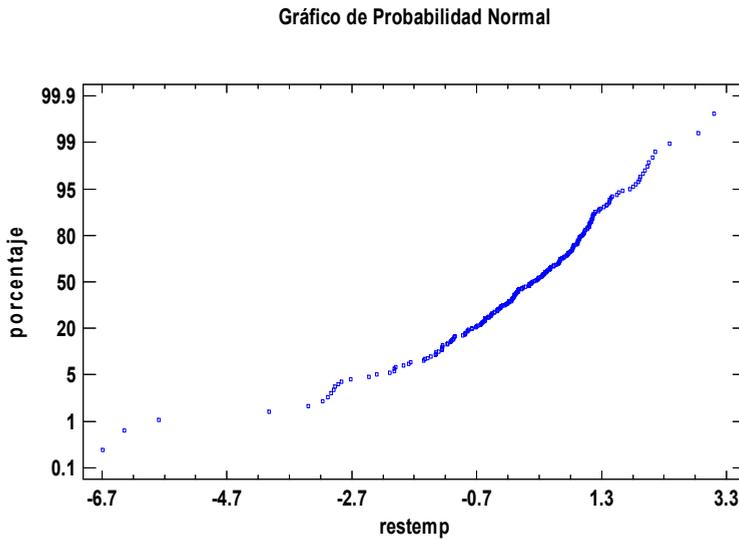
La relación de la temperatura de la muestra con el grosor del electrodo presenta una curvatura muy marcada, de forma que la temperatura es mínima para grosores del orden de 9.5 mm, aumentando para valores más bajos o más altos de esta variable.

Finalmente se constata una relación negativa de la temperatura de la muestra con el caudal, aumentando aquélla al disminuir éste, detectándose también una ligera relación positiva de dicha temperatura con la humedad.

La relación obtenida es bastante buena, pues el valor de 77.2% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para la temperatura de la muestra por el modelo y el realmente obtenido es 0.878 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno).



**Apéndice III. Figura 23 Gráfico de Temperatura muestra. Valor observado y valor predicho para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**



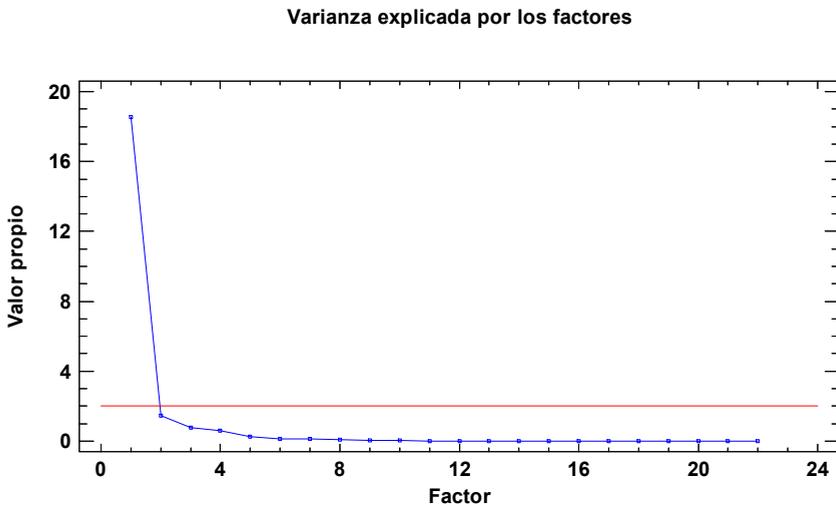
**Apéndice III. Figura 24 Gráfico de residuos variable independiente temperatura muestra para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Por otra parte, en el gráfico de los residuos en papel probabilístico normal (ver al lado), si se prescinde de los correspondientes a las tres observaciones anómalas mencionadas, se aprecia una configuración bastante lineal que pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

### 3.3. Espectro

#### 3.3.1. Resultados del Análisis Factorial de las variables del espectro

La siguiente figura recoge la varianza explicada por los diferentes factores obtenidos en el análisis (medida por el correspondiente valor propio) ordenados de forma decreciente. Debe de entenderse que los factores son un número reducido de entes subyacentes que explican la variabilidad observada en un número elevado de variables intercorrelacionadas. Se identifican a partir de sus correlaciones con las distintas variables.



**Apéndice III. Figura 25 Varianza explicada por los factores para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.**

Se constata la existencia de un factor cuya importancia es muy superior a las del resto, a dicho factor lo vamos a denominar Factor A. El Factor A se define y explica a partir de sus correlaciones con las distintas variables.

Para analizar el significado del Factor A, en la siguiente tabla se recogen sus correlaciones con cada una de las 22 variables primitivas.

En la siguiente tabla se encuentra los Coeficientes de correlación del Factor A con las 22 variables primitivas

	<i>Factor A</i>
<b>ALTURA1</b>	0.939705
<b>ALTURA10</b>	0.989927
<b>ALTURA11</b>	0.991115
<b>ALTURA2</b>	0.994278
<b>ALTURA3</b>	0.995322
<b>ALTURA4</b>	0.995958
<b>ALTURA5</b>	0.995781
<b>ALTURA6</b>	0.995445
<b>ALTURA7</b>	0.984834
<b>ALTURA8</b>	0.498348
<b>ALTURA9</b>	0.988925
<b>AREA1</b>	0.880395
<b>AREA10</b>	0.623764
<b>AREA11</b>	0.881431
<b>AREA2</b>	0.995062
<b>AREA3</b>	0.996513
<b>AREA4</b>	0.9961
<b>AREA5</b>	0.996496
<b>AREA6</b>	0.994354
<b>AREA7</b>	0.887875
<b>AREA8</b>	-0.213594
<b>AREA9</b>	0.906358

**Apéndice III. Tabla 15 Los Coeficientes de correlación del Factor A con las 22 variables primitivas del espectro para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS**

Se constata que el Factor A está estrechamente correlacionado de forma positiva con las alturas y las áreas de todos los picos, con excepción del pico 8.

Las fuertes correlaciones constatadas entre el Factor A y las alturas y áreas de los picos (con la excepción ya señalada del 8) indican que la importancia de los distintos picos ha variado en paralelo en los ensayos, de forma que el valor del Factor A en cada ensayo es una medida global de hasta qué punto han aparecido picos importantes en el espectro. Así, los ensayos con valores positivos altos del Factor A corresponden a espectros con valores altos de las alturas y de las áreas de todos los picos,

produciéndose la situación contraria e los ensayos correspondientes a valores muy negativos del Factor A. Como hemos indicado, sólo la importancia del pico 8 parece estar poco relacionada con las de los restantes picos.

Relación del Factor A del espectro con las condiciones operativas.

También para el Factor A del espectro los gráficos exploratorios previos sugirieron la posibilidad de efectos no lineales para algunas de las variables operativas. En consecuencia al realizar el ajuste del modelo se incluyeron entre las variables candidatas a entrar en el modelo términos cuadráticos para algunas de dichas variables

Los resultados del ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente el valor resultante para el Factor A en cada ensayo, han sido los siguientes:

- Variable dependiente: Factor A.
- Variables independientes:
  - Grosor del electrodo (Gros\_Elec).
  - Voltaje.
  - Frecuencia.
  - Humedad.
  - Caudal.
  - Gros\_Elec<sup>2</sup>.
  - Voltaje<sup>2</sup>.
  - Frecuencia<sup>2</sup>.

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
		<i>Estándar</i>	<i>T</i>	
<b>CONSTANTE</b>	-1286.33	156.313	-8.22919	0.0000
<b>Gros_Elec</b>	236.808	32.359	7.31815	0.0000
<b>Voltaje</b>	10.2376	1.40915	7.26509	0.0000
<b>Frecuencia</b>	17.7599	1.51669	11.7096	0.0000
<b>Humedad</b>	-0.0603936	0.0181041	-3.3359	0.0010
<b>Caudal</b>	-0.225599	0.0833728	-2.7059	0.0073
<b>Gros_Elec<sup>2</sup></b>	-12.1982	1.69219	-7.20856	0.0000
<b>Voltaje<sup>2</sup></b>	-0.155551	0.0476927	-3.26154	0.0013

<b>Frecuencia<sup>2</sup></b>	-1.64207	0.167319	-9.81397	0.0000
-------------------------------	----------	----------	----------	--------

**Apéndice III. Tabla 16 Ajuste mediante la técnica de regresión “stepwise”, utilizando como variable dependiente Factor A para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.**

R-cuadrada = 84.9208 por ciento.

Desviación típica residual = 7.32708.

La ecuación que nos da el Factor A previsto por el modelo es:

$$F_A = -1286.33 + 236.808 \cdot d + 10.2376 \cdot V + 17.7599 \cdot v - 0.0603936 \cdot H - 0.225599 \cdot C - 12.1982 \cdot d^2 - 0.155551 \cdot V^2 - 1.64207 \cdot v^2$$

Siendo:

$F_A$  = Factor A.

d = Diámetro o grosor del electrodo de potencia.

V = Voltaje.

v = Frecuencia.

H = Humedad el aire cero.

C = Caudal de aire cero.

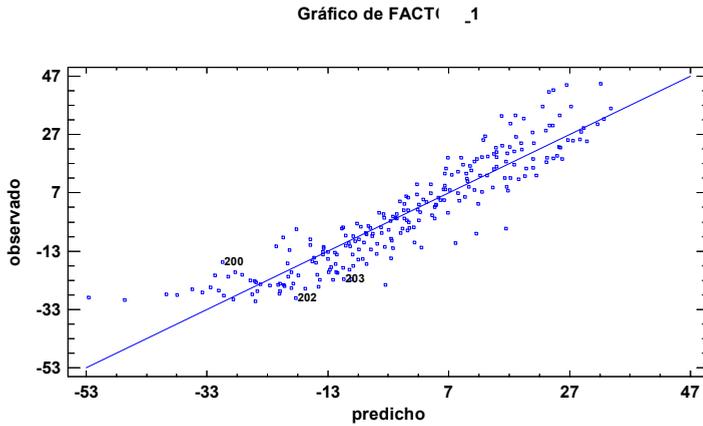
Todas las variables operativas tienen efectos estadísticamente significativos sobre el Factor A del espectro.

La relación de la temperatura del Factor A con el grosor del electrodo presenta una curvatura significativa, de forma que dicho Factor A es máximo para grosores del orden de 9.7 mm, disminuyendo para valores más bajos o más altos de esta variable.

Tanto en el caso del Voltaje como en el de la Frecuencia el valor del Factor A aumenta al hacerlo dichas variables, pero la curvatura negativa detectada indica que en ambos casos dicho aumento es cada vez menos marcado a medida que se incrementan los valores de las mismas.

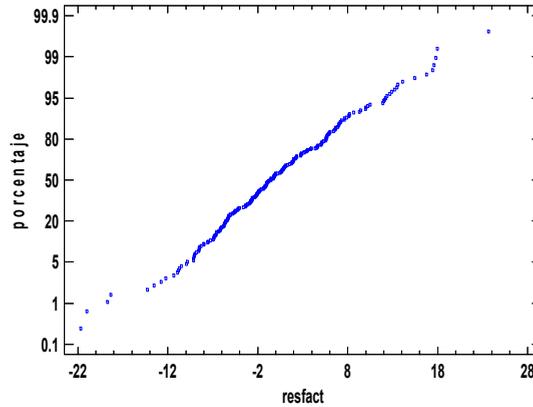
Finalmente, tanto la Humedad como el Caudal tienen una ligera relación negativa con el Factor, disminuyendo los valores de éste al aumentar dichas variables.

La relación entre el Factor A del espectro y las variables operativas es estrecha, pues el valor de 84.9% obtenido para  $R^2$ , indica que el coeficiente de correlación entre el valor previsto para el Factor A por el modelo y el realmente obtenido es 0.921 (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno) (que es la raíz cuadrada del  $R^2$  expresado éste en tanto por uno). En la siguiente figura se constata la relación entre los valores previstos por el modelo para el Factor A y sus valores reales.



**Apéndice III. Figura 26 Gráfico del Factor A del espectro. Valor observado y valor predicho para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.**

Gráfico de Probabilidad Normal



**Apéndice III Figura 27 Gráfico de residuos variable independiente Factor A del espectro para el sistema APPJ-NTP con amplificador Trek modelo 10/10B-HS.4**

Por otra parte, la configuración lineal del gráfico de los residuos en papel probabilístico normal pone de manifiesto que las hipótesis básicas del modelo de regresión son aceptables.

