

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIA**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**ESTUDIO, ANALISIS Y DISEÑO DE ANTORCHA DE  
PLASMA PARA ELIMINACIÓN DE RESIDUOS HOSPITALARIOS  
EN CHILE.**

**XIMENA JESÚS DÍAZ RAMÍREZ**

Profesor Guía: Dr. Marcelo Zambra  
Profesor Patrocinante: Dr. Ernesto Gramsch

Tesis Para Optar Al Título Profesional De Ingeniera Física.

Santiago, Chile.

2014

*“Estudio, Análisis Y Diseño De Antorcha De Plasma Para  
Eliminación De Residuos Hospitalarios En Chile”.*

Trabajo de graduación presentado en la Facultad de Ciencia,  
en cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para optar al  
título profesional de Ingeniera Física.

Universidad de Santiago de Chile

Santiago de Chile

2014

**“Estudio, Análisis Y Diseño De Antorcha De Plasma Para  
Eliminación De Residuos Hospitalarios En Chile”**

**XIMENA JESUS DIAZ RAMIREZ**

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Marcelo Zambra, Jefe Depto. De Aplicaciones Nucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora

Dr. Ernesto Gramsh \_\_\_\_\_

Dr. Daniel Serafini \_\_\_\_\_

Dr. José Moreno \_\_\_\_\_

Dra. Yolanda Vargas \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Dr. Marcelo Zambra

Profesor Guía

\_\_\_\_\_  
Dra. Yolanda Vargas

Directora del departamento de Física.

## AGRADECIMIENTOS

Muy agradecida por el eterno e incondicional apoyo de mis padres Nancy y Manuel por luchar incansablemente para darme una excelente educación y hacer que todo esto fuese posible, gracias por levantarme en las etapas difíciles y celebrar las triunfantes en el transcurso de mi carrera. A mi querido hermano Eduardo por su sabiduría y experiencia las cuales me ayudaron a tomar las decisiones correctas. A mis adoradas y mejores amigas Tía Toya y Tía María Eugenia por el cariño, confianza y apoyo. También a Mauricio, mí amado novio, compañero de vida y amigo, ya que nunca ha dejado mano en el camino, siendo este pedregoso o llano. Además quiero darle mis eternos agradecimientos a Don Marcelo Zambra quien deposito su confianza en mí para llevar a cabo este trabajo, siempre valoraré su asesoría académica y su destacable su calidad humana.

Agradezco el apoyo del equipo del Departamento de Plasmas Termonucleares quienes también hicieron posible el desarrollo de este trabajo, al Dr. Biswajit Bora por su ayuda y enseñanza sobre el tema de tesis, también a Patricio San Martín, Diana Morales y José Pedreros por su noble amistad.

Cierro esta etapa muy satisfecha por la calidad académica entregada por el Departamento de Física, a los profesores por su buena disposición, al Dr. Ernesto Gramsh por su ayuda y confianza. A todo el personal administrativo en especial a Leonor, Roxana y Edith por su eficacia y cariño.

Con especial cariño quiero agradecer a la persona que hizo posible superar miedos extremadamente limitantes para continuar mi carrera, fue quien me dio el aliento para seguir adelante y avanzar con “*Pachorra*”, Dr. Carlos Esparza Barrera, excelente académico, de sabiduría infinita y valiosa persona.

*“Desde Hoy Creo Que Si Es Posible Sembrar Sobre Cemento...”*

## RESUMEN

Dentro del campo de las nuevas tecnologías en la industria, el empleo del plasma está destacando por su gran velocidad de expansión y desarrollo. Actualmente uno de sus usos es la eliminación de residuos ya que permite evitar problemas como la formación de subproductos transportados por el aire y sólidos peligrosos que representan un grave problema para el medio ambiente y la salud de las personas.

El plasma, cuando se encuentra a temperaturas extremas, superiores a los tres mil grados Celsius, provoca que los residuos inorgánicos se desintegren y vitrifiquen en un residuo sólido mientras que los residuos orgánicos se conviertan en gases. A diferencia de cualquier otro tratamiento térmico de residuos (incineración, gasificación, pirólisis, etc.) y debido a que no se trata de un proceso de combustión, sino de atomización de la materia, no se producen emisiones contaminantes a la atmósfera (dioxinas y similares) ni cenizas, tan solo quedan gases simples y un sólido inerte completamente vitrificado que puede ser empleado en la construcción, para la obtención de mobiliario urbano, como elemento decorativo, por ejemplo.

El objetivo principal del tema de tesis es contribuir en la generación de conocimiento en el ámbito de la reducción de desechos hospitalarios mediante el uso de aplicaciones tecnológicas de plasmas, generando la investigación necesaria para el estudio del arte y desarrollo tecnológico a nivel experimental en el ámbito señalado.

El proyecto de tesis propone diseñar un dispositivo a nivel experimental, antorcha de plasma de laboratorio, para investigar su aplicación en la reducción de desechos hospitalarios.

Se espera realizar el diseño de un dispositivo a nivel experimental que produzca un chorro de plasma, cuya temperatura sea la adecuada para realizar tratamientos de residuos hospitalarios capaz de reducirlos en volumen, destruir y eliminar la toxicidad de estos, como también evitar emisiones contaminantes, además de generar una política de salud pública más responsable con respecto al tema.

Este estudio fue realizado en el departamento de Plasmas Termonucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, recopilando información de distintos textos y publicaciones disponibles en dicha entidad referente al tema de plasmas térmicos aplicados a destrucción de materiales, además del apoyo del personal académico y técnico especializado en el tema, contribuyendo así el objetivo de esta tesis.

Los resultados obtenidos corresponden a un diseño esquemático con cada variable de funcionamiento definida con argumentos físicos y matemáticos con respecto al tema, es decir, geometría del dispositivo, materiales de cada una de sus partes, gas de trabajo, características eléctricas y dimensiones de las piezas para generación de plasmas térmicos.

## INDICE GENERAL

1) Características Del Plasma: .....	1
1.1 Que Es Un Plasma? .....	2
1.2 Concepto De Temperatura En El Plasma: .....	3
1.2.1 Apantallamiento De Debye: .....	5
1.3 Cuasi-Neutralidad: .....	9
1.4 Frecuencia De Oscilación Del Plasma: .....	9
1.5 Clasificación Del Plasma: .....	13
1.5.1 Plasma En Desequilibrio Térmico: .....	14
1.5.2 Plasma Térmico Y Equilibrio Termodinámico Local (ETL):.....	14
1.6 Generación De Plasmas Térmicos: .....	15
1.6.1 Arcos Libres: .....	16
1.6.2 Arcos Estabilizados Por Paredes: .....	17
1.6.3 Arcos estabilizados por convección forzada: .....	17
1.7 Aplicaciones Tecnológicas De Los Plasmas Térmicos: .....	18
1.8 Descarga de Arco: .....	20
1.8.1 Propiedades Del Arco Eléctrico:.....	24
1.8.2 Iniciación de un Arco: .....	29
1.8.3 Potencial de Ruptura: .....	30
2 Antorcha De Plasma .....	33
2.1 Estabilidad Eléctrica De La Antorcha De Plasma En Relación Con La Fuente De Poder: .....	35

2.2	Encendido Del Arco En Una Antorcha De Plasma:.....	37
2.3	Electrodos:.....	38
3	Conceptos Generales Sobre Desechos: .....	40
3.1	Caracterización De Los Desechos Hospitalarios:.....	40
3.2	Definiciones Reglamentarias Vigentes En Chile:.....	46
4	Manejo De Desechos Hospitalarios En Chile:.....	47
4.1	Descripción De Las Etapas Del Manejo De Residuos.....	49
5	Tratamientos Para Los Residuos Hospitalarios: .....	52
5.1	Sistemas De Tratamientos Más Conocidos Actualmente Para Residuos Hospitalarios:.....	53
5.1.1	Desinfección Química: .....	54
5.1.2	Desinfección Térmica Húmeda: .....	55
5.1.3	Desinfección Por Microondas: .....	56
5.1.4	Desinfección Por Irradiación: .....	56
5.1.5	Incineración:.....	57
5.1.6	Otras tecnologías:.....	60
5.2	Estrategia general frente al problema de los residuoshospitalarios:..	63
6	Proceso de Gasificación por plasma en eliminación de residuos: .....	64
6.1	Características Diferenciales Del Proceso De Gasificación Por Plasma: .....	65
6.2	Capacidad de tratamiento:.....	66
6.2.1	Subproductos del proceso: .....	67



6.3	Residuos Y Emisiones:.....	69
6.4	Especificaciones Eléctricas: .....	71
6.5	Planos De Propuesta De Diseño: .....	73
7	Conclusión: .....	80
8	Bibliografía: .....	85

## INDICE DE FIGURAS:

Figura 1 Estados de la Materia en el Universo. ....	1
Figura 2 Plasmas Naturales; Aurora Boreal y Viento Solar. ....	2
Figura 3 Esfera de Debye. ....	8
Figura 4 .....	13
Figura 5 Temperatura y densidades típicas en arcos de plasma a presión atmosférica. ....	16
Figura 6 Destrucción de Materiales con Plasma Térmico. ....	19
Figura 7 Corte por plasma térmico. ....	20
Figura 8 Descarga de Arco eléctrico. ....	21
Figura 9 Curva $V$ vs $I$ para varios tipos de descarga. ....	22
Figura 10 Regiones de una descarga de arco. ....	24
Figura 11. Divisiones de la región del ánodo. ....	28
Figura 12 <i>Curvas de Paschen</i> correspondientes a distintos tipos de gases. Ref: <a href="http://wikipedia.org/Paschen's law">wikipedia.org/Paschen's law</a> .....	31
Figura 13 Antorcha de Plasma. Ref: Pyrogenesis Engine. ....	33
Figura 14 Antorchas de Plasma en operación de modo arco (a) Transferido y (b) No Transferido. Ref: <i>Tese de maestreado "Estudo De Tochas De Plasma Através Da Teoriada Similaridade"</i> .....	34
Figura 15 Diagrama de los dipolos conectados .....	35
Figura 16 Estabilidad eléctrica del punto de operación del arco con característica descendente. Ref: <i>Tese de maestreado "Estudo De Tochas De Plasma Através Da Teoriada Similaridade"</i> .....	36

Figura 17 Diagrama esquemático de la fuente ideal de tensión y corriente. <i>Ref: Tese de maestreado "Estudo De Tochas De Plasma Através Da Teoriada Similaridade"</i> .....	37
Figura 18 Disposición final Ilegal de los desechos hospitalarios en Cabrero; Fuente: Diario Universidad de Chile, "Denuncia de vertedero ilegal de Residuos hospitalarios en Ruta 5 Sur (Cabrero)"; Julio 2012. ....	46
Figura 19 Etapas del manejo de residuos. Elab. Propia. ....	48
Figura 20 Proceso de desinfección Química. ....	54
Figura 21 Proceso de Incineración .....	59
Figura 22 Campaña contra la incineración de desechos patogénicos y el riesgo de la salud intra y extra hospitalaria en Argentina. ....	64
Figura 23 Arena formada desde Slag enfriado con agua.....	67
Figura 24 Nódulos metálicos separados de la arena.....	68
Figura 25 Slag enfriado al aire.....	68
Figura 26 Antorcha de plasma no transferido. ....	73
Figura 27 Corte Axial de la Antorcha de Plasma.....	74
Figura 28 Electrodo de la Antorcha de Plasma propuesta a nivel experimental. ....	75
Figura 29 Esquema Del Ánodo De La Antorcha De Plasma Experimental. <i>Ref: Plasma Torch, 3rd Generation, (VTPT-3) [14]</i> .....	76
Figura 30 Esquema del cátodo de la Antorcha de Plasma a Nivel Experimental. ....	77
Figura 31 Esquema Ánodo, Cátodo y Gap "G", para la Antorcha de Plasma a nivel experimental. ....	78
Figura 32 Isotermas de un Chorro de Plasma a 400[A]. Ref [5] .....	79

Figura 33 Distancia radial v/s Temperatura a lo largo del chorro de plasma.Ref: [12].....80

## I) Física del Plasma:

### 1) Características Del Plasma:

Hasta hace sólo unas cuantas décadas imaginábamos que toda la materia del Universo era sólida, líquida o gaseosa, lo que llamamos *los tres estados de la materia*. Al descubrir el estado de plasma y empezar a estudiar su comportamiento tan singular, se decidió adoptar para éste el término *cuarto estado de la materia*, pues en conjunto corresponde a un estado de mayor energía que los tres anteriores. En la Figura 1 se muestran los 4 estados de la materia presentes en el universo.

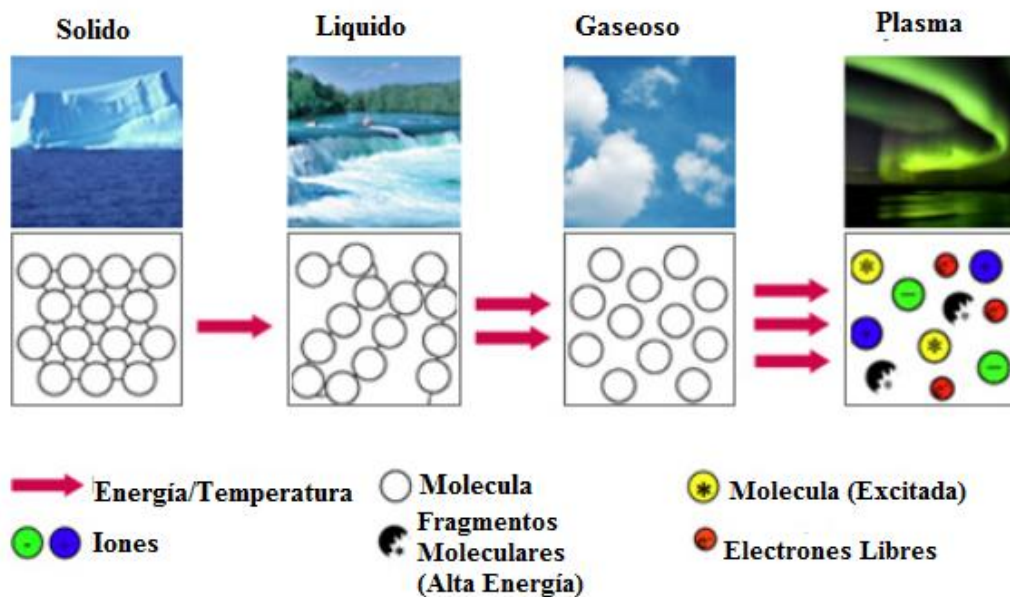


Figura 1 Estados de la Materia en el Universo.

## 1.1 ¿Qué Es Un Plasma?

La palabra plasma fue introducida por primera vez por I. Langmuir y L. Tonks en 1928 para describir un gas ionizado de una descarga eléctrica.

El plasma es un gas ionizado, conformado por electrones e iones libres, pero eléctricamente neutro, que exhibe un comportamiento colectivo, es decir responde colectivamente a impulsos internos y externos. Este comportamiento colectivo del plasma se debe al gran alcance de las fuerzas electromagnéticas que generan entre sí las partículas cargadas que lo componen.

Se dice que el 99% de la materia del universo se encuentra en el estado de plasma, algunos ejemplos de esta se pueden encontrar en la ionosfera, las auroras boreales, el viento solar (Figura 2) y a nivel de laboratorio se tienen descargas de arco, en lámparas fluorescentes y en reacciones termonucleares.

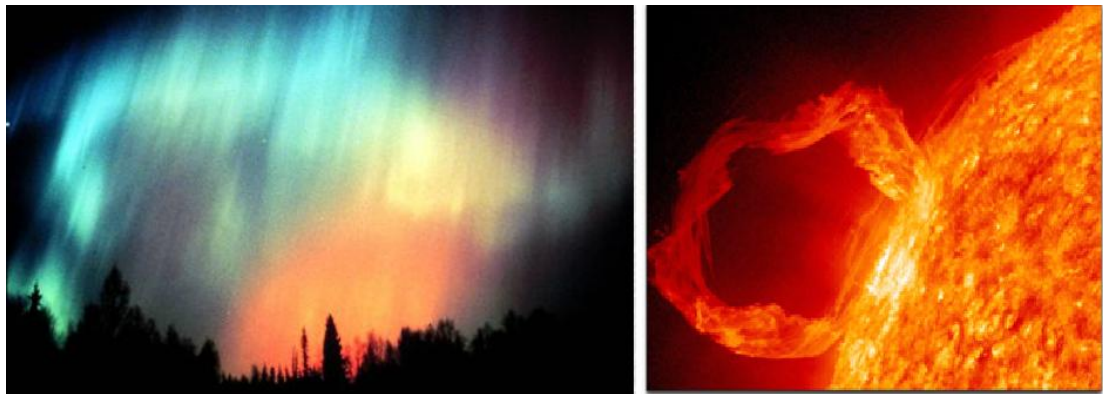


Figura 2 Plasmas Naturales; Aurora Boreal y Viento Solar.

Sabemos que los átomos están formados por un *núcleo*, que está formado por partes, como los protones, con carga positiva, y neutrones, eléctricamente neutros. Los electrones, cargados negativamente, permanecen ligados a éste

mediante la fuerza electromagnética. Así, los átomos en su forma completa son eléctricamente neutros. Cuando se extraen del átomo uno o más electrones, lo que queda tiene un exceso de carga positiva a lo cual se conoce como un *ion*.

Una sustancia que contiene iones y a la vez que conserva los electrones, es un *plasma* en el cual hay electrones que pierden su identidad con su núcleo, así, vagan de núcleo en núcleo, por lo mismo desde fuera se ve un gas cuasi-neutro eléctricamente hablando. Así pues, el plasma no es un material particular; sino un *estado específico* de la materia, un gas.

Es importante destacar que el estado de plasma no implica necesariamente altas temperaturas, la ionización de un material puede producirse por diversos medios. Se pueden producir plasmas por *descargas eléctricas*, esto es, si a un gas ordinario se le aplica un campo eléctrico muy intenso pueden desprenderse algunos electrones, quedando estos átomos ionizados y algunos de sus electrones libres. Estos electrones libres serán acelerados por el campo eléctrico y chocarán con otros átomos, desprendiendo algunos de sus electrones, y así el proceso continúa como una avalancha.

## 1.2 Concepto De Temperatura En El Plasma:

Las partículas de un gas en equilibrio térmico obedecen a una *distribución de Maxwell-Boltzmann*, para simplificar supongamos que las partículas solo se mueven en una dimensión, la cual viene dada por:

$$f(v) = A \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{mv^2}{k_B T} \right] \quad (1.1.1)$$

Donde  $f(v)dv$  es el número de partículas por  $cm^3$  con velocidades entre  $v$  y  $v + dv$ , la energía cinética es  $\frac{1}{2}mv^2$ ,  $k_B$  la constante de Boltzmann y  $T$  la Temperatura.

La densidad o el número de partículas por  $cm^3$  está dado por:

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} f(v) dv \quad (1.1.2)$$

y  $A$ , la constante de normalización de la distribución expresada como:

$$A = n \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2}$$

En física del plasma la temperatura se da en unidades de electrón-volt [ $eV$ ], primero se calcula la energía en Joule [ $J$ ], por medio de  $(k_B T)$  y luego se convierte a [ $eV$ ] con la siguiente igualdad:

$$1[eV] = 11.600[K]$$

En el plasma de una descarga en un gas por ejemplo, la energía cinética de los electrones y de los iones es diferente, es por esto que la temperatura del plasma se describe en términos de la temperatura de cada una de sus especies involucrada, es decir,  $T_i$  (temperatura iónica) y  $T_e$  (temperatura electrónica). Por lo tanto, en dicho plasma pueden existir varias temperaturas al mismo tiempo, ya que tanto iones como electrones presentan distribuciones de Maxwell separadas con diferentes temperaturas  $T_i$  y  $T_e$ . Las diferentes distribuciones se deben a que la tasa de colisión entre ion – ion y electrón – electrón es mayor que la tasa de colisiones entre iones – electrones.

La temperatura electrónica del plasma representa la energía cinética promedio de los electrones y la hace una característica colectiva del plasma. Cuando hay un campo magnético  $B$ , incluso para una sola especie, por ejemplo los iones, se pueden tener dos temperaturas. Esto se debe a que las fuerzas que actúan sobre un ion a lo largo de  $B$  son diferentes a las fuerzas que actúan perpendicularmente a  $B$  (debido a las *Fuerzas de Lorentz*). Las componentes



de la velocidad perpendicular a  $B$  y paralela a  $B$  pueden tener diferentes distribuciones de Maxwell con temperaturas  $T_i$  y  $T_e$  [1].

### 1.2.1 Apantallamiento De Debye:

Una característica importante de los plasmas es su propiedad de apantallar potenciales eléctricos aplicados a él y conservar su *cuasi – neutralidad*. Un plasma en equilibrio es eléctricamente neutro e isotérmico. Al producir una perturbación de este equilibrio introduciendo una carga de prueba en medio del plasma, dicha carga atraerá electrones y repelerá iones en su vecindad. El potencial  $\phi$  formado por la carga de prueba estará dado por:

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1.2.1)$$

Si se considera que la partícula tiene energía, tanto cinética como potencial de la forma  $E = \frac{1}{2}mv^2 + q\phi$ , el factor de Boltzmann queda expresado como

$$\exp\left(\frac{-1/2 mv^2 + q\phi}{k_B T_e}\right)$$

Como  $\phi$  depende de la posición, entonces el factor de Boltzmann también dependerá de la posición. Así al integrar la función de distribución sobre todas las velocidades en el espacio, se puede encontrar la densidad tanto de iones como de electrones la que estará dada por:

$$n = \int f(v)dv_x dv_y dv_z \quad (1.2.2)$$

Y por lo tanto,

$$n \propto \exp\left(-\frac{q\phi}{k_B T}\right)$$

Para los electrones la densidad estará dada por:

$$n_e = \int f_e(v) d^3v = n_0 \exp\left(-\frac{e\phi}{k_B T}\right) \quad (1.2.3)$$

Y Para los iones, suponiendo que están simplemente ionizados, la densidad estará dada por:

$$n_i = n_0 \exp\left(-\frac{e\phi}{k_B T}\right) \quad (1.2.4)$$

Esto implica que los electrones atraen a su alrededor cargas positivas, y viceversa, lo que considera un apantallamiento de la carga original de prueba.

Si se asume un plasma en una dimensión y se soluciona para la distribución de potencial la *Ecuación de Poisson*, entonces por la ley de Gauss se tiene que:

$$\nabla \cdot E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (1.2.5)$$

$$E = -\nabla\phi \quad (1.2.6)$$

Al reemplazar (1.2.6) en (1.2.5) se obtiene la conocida *Ecuación de Poisson* dada por:

$$-\nabla^2\phi = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (1.2.7)$$

La densidad de carga  $\sigma$ , estará dada por:

$$\sigma = -en_{e+}en_i = en_0 \left( -\exp\frac{e\phi}{k_B T} + \exp\frac{-e\phi}{k_B T} \right) \quad (1.2.8)$$

Si consideramos que el término de potencial es muy pequeño con respecto a la temperatura,  $e\phi \ll k_B T$  y además expandimos en serie de potencia la ecuación (1.2.8), se tiene para la densidad de carga:

$$\sigma \cong -en_0 \left(1 - \frac{e\phi}{k_B T}\right) + en_0 \left(1 + \frac{e\phi}{k_B T}\right) = \frac{2n_0 e^2 \phi}{k_B T} \quad (1.2.9)$$

Tomando en cuenta una simetría esférica y con la ayuda de coordenadas esféricas:

$$-\nabla^2 \phi \equiv \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d\phi}{dr} \right)$$

Se tiene, por lo tanto, para la ecuación de Poisson la siguiente expresión:

$$-\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) = -2 \frac{n_0 e^2 \phi}{\epsilon_0 k_B T}$$

Cuya solución está dada por:

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \exp \left[ -\frac{r}{\sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{2n_0 e^2}}} \right] \quad (1.2.10)$$

Por lo tanto en (1.2.10) se tiene que  $\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{2n_0 e^2}}$ , conocida como la “*Longitud de Debye*”, esta representa la distancia a la cual un pequeño potencial puede perturbar un plasma, entonces el potencial se puede escribir de la forma:

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \exp \left[ -\frac{r}{\lambda_D} \right] \quad (1.2.11)$$

Donde se puede observar que el potencial decae exponencialmente y resulta apantallado a una distancia igual a  $\lambda_D$ , es decir, una carga perteneciente al

plasma interactúa con las demás que se encuentren en una esfera de radio  $\lambda_D$  conocida como “*Esfera de Debye*” (ver

Figura 3).

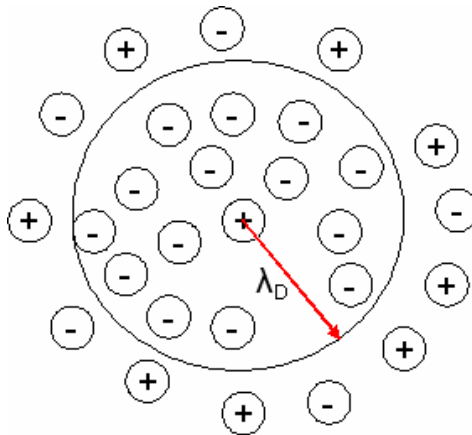


Figura 3 Esfera de Debye.

De la relación (1.2.10) al aumentar la densidad,  $\lambda_D$  disminuye como uno espera, ya que en cada parte del plasma habrá mayor cantidad de electrones, además  $\lambda_D$  aumenta al aumentar  $k_B T$ .

La longitud de Debye es uno de los parámetros importantes en física del plasma. En la definición de ésta, con frecuencia se trabaja con la temperatura electrónica  $T_e$  ya que los electrones tienen mayor movilidad que los iones [1,2].

Para determinar si un gas ionizado puede ser considerado un plasma, se deben satisfacer ciertas condiciones, tales como:

i) La dimensión del sistema debe ser mayor que la longitud de Debye,

$$L \gg \lambda_D$$

ii) Debe existir una gran cantidad de electrones para generar apantallamiento, es decir,

$$N_D \gg 1$$

Donde  $N_D$  es el número de electrones dentro de una esfera de Debye.

### 1.3 Cuasi-Neutralidad:

Cualquier acumulación de carga de un solo signo en cierta región del plasma producirá una fuerza atractiva para las cargas opuestas lo suficientemente grande como para recuperar el equilibrio de la carga eléctrica casi instantáneamente. Si el plasma no es forzado por campos eléctricos o magnéticos muy intensos, éste permanecerá en un estado de “*cuasi-neutralidad*”, esto es  $n_i \approx n_e \approx n$ , donde  $n$  es una densidad común llamada “*densidad del plasma*” [2].

### 1.4 Frecuencia De Oscilación Del Plasma:

El plasma tiene la tendencia de comenzar a oscilar después de ser perturbado; al estudiar un plasma compuesto por electrones e iones positivos con densidades iniciales  $n_i = n_e = n_0$  iguales y asumiendo también que inicialmente los iones y electrones se encuentran en reposo, surge el siguiente interrogante, ¿Qué sucedería si los electrones fueran desplazados de sus posiciones de equilibrio?, si se perturba el sistema aplicando un campo eléctrico  $E_1$ , los electrones debido a su fácil movilidad reaccionan inmediatamente al campo eléctrico y su densidad cambia a:

$$n_e = n_0 + n_1(r, t) \tag{1.4.1}$$

Mientras que los iones permanecen casi en reposo, debido a su inercia; por consiguiente las cargas son separadas y se forma un campo eléctrico interno dentro del plasma.

Después de anular el campo eléctrico externo, los electrones son acelerados por el campo eléctrico interno, tratando de restaurar la neutralidad de las cargas. Sin embargo, debido a la energía cinética de los electrones causada por el campo externo, los electrones se mueven más allá de su posición de equilibrio, mientras que el campo eléctrico interno actúa sobre los electrones en dirección opuesta acelerando nuevamente los electrones para alcanzar su posición de equilibrio. Es decir, los electrones oscilan debido a la perturbación producida por el campo eléctrico. Dichas oscilaciones son muy rápidas, tan rápidas que los iones no tienen tiempo para responder.

La frecuencia de dicha oscilación se puede determinar al asumir lo siguiente: El número de electrones se conserva, por lo tanto, la densidad electrónica obedece a la ecuación similar de la conservación de la carga eléctrica, conocida como la *ecuación de continuidad*, la que iguala la variación de densidad en un volumen pequeño, al flujo a través de una superficie, por lo tanto, para la densidad electrónica se tiene:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \nabla \cdot (n_e v_e) = 0 \quad (1.4.2)$$

En el primer orden de la perturbación, la ecuación (1.4.2) queda como:

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = n_0 \nabla \cdot v_1 = 0 \quad (1.4.3)$$

Donde  $v_e = v_1$  es la velocidad de los electrones debido a la perturbación.

El campo eléctrico produce una fuerza dada por:

$$F = qE_1 \quad (1.4.4)$$

Y la ecuación del movimiento para los electrones queda como:

$$m \frac{\partial v_1}{\partial t} = -qE_1 \quad (1.4.5)$$

Por otra parte, el campo eléctrico  $E_1$  se determina por la perturbación de la densidad según la primera ecuación de Maxwell (Ley de Coulomb) dada por:

$$\nabla \cdot E_1 = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.4.6)$$

La que puede ser escrita como:

$$\nabla \cdot E_1 = -\frac{en_1}{\epsilon_0} \quad (1.4.7)$$

Aplicando la derivada parcial  $\partial/\partial t$  a la ecuación (1.4.3) y con la ayuda de las ecuaciones (1.4.5) y (1.4.7) se obtiene:

$$\frac{\partial^2 n_1}{\partial t^2} + \left( \frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e} \right) n_1 = 0 \quad (1.4.8)$$

Lo que corresponde a la ecuación de una oscilación (onda estacionaria), con una frecuencia angular dada por:

$$\omega^2 = \frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e}$$

A la que se le aplica raíz cuadrada, obteniendo:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1.4.9)$$

Conocida como *Frecuencia del Plasma* [1,2].

Los parámetros que muestran un comportamiento colectivo del plasma son entonces la frecuencia del plasma  $\omega_p$ , la longitud de Debye  $\lambda_D$  y la ionización crítica  $\alpha_0$ , pero hay que tener en cuenta las tres condiciones que un plasma debe satisfacer para que exista en un gas ionizado, las que con las anteriormente citadas son (*sección 1.21*)

$$\lambda_D \ll L$$

$$N_D \gg 1$$

$$\omega_p \tau > 1$$

Donde  $\tau$  es el tiempo de colisión entre las partículas cargadas con los átomos neutros.

Las oscilaciones del plasma se clasifican en oscilaciones electrónicas y en oscilaciones iónicas, la frecuencia del plasma total se puede escribir como:

$$\omega_p^2 = \omega_i^2 + \omega_e^2 \quad (1.4.10)$$

Donde la frecuencia de las oscilaciones electrónicas del plasma son más altas que las oscilaciones iónicas  $\omega_e \gg \omega_i$ , debido a que la masa del electrón es pequeña comparada con la masa de los iones. El producto entre la longitud de Debye  $\lambda_D$  y la frecuencia de plasma  $\omega_p$ , da como resultado la velocidad media de los electrones, y se expresa como:

$$\bar{v} = \omega_p \lambda_D = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_e}} \quad (1.4.11)$$



## 1.5 Clasificación Del Plasma:

Los plasmas se caracterizan por su energía electrónica  $k_B T$  y su densidad electrónica  $n_e$ . Los plasmas utilizados para la preparación de películas delgadas se encuentran en la categoría de descargas Glow o luminiscentes a bajas presiones. El plasma generado en la descarga de arco puede ser creado a presión atmosférica o por encima de dicha presión, aunque el plasma en una descarga de arco tiene una baja energía electrónica, su densidad electrónica es muy grande en comparación con la descarga Glow o luminiscente. Los diferentes tipos de plasmas existentes en la naturaleza se ilustran en la Figura 4.

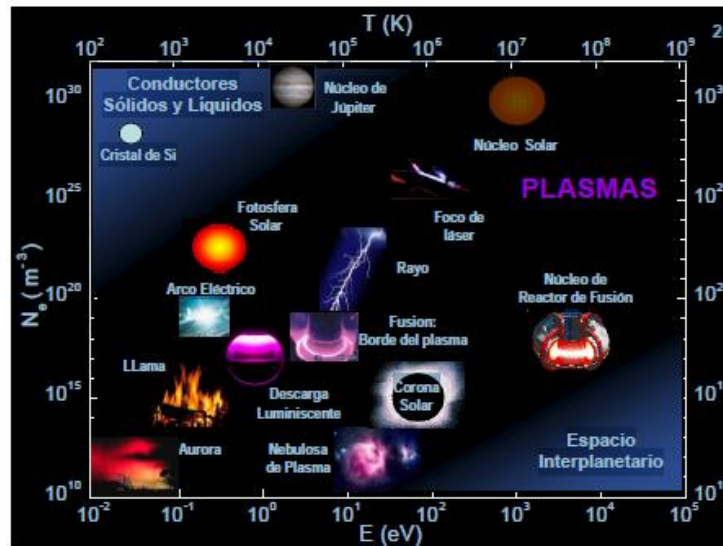


Figura 4

Temperatura, Densidad electrónica y Energía de diversos plasmas naturales y de investigación,  
Ref: American Physical Society, Division of Plasma Physics.

### 1.5.1 Plasma En Desequilibrio Térmico:

Este tipo de plasma puede ser obtenido por medio de una corriente directa en una descarga “glow”, también puede ser generado por una alta frecuencia o por una radiación con microondas a baja presión. Una característica de este plasma es la carencia de equilibrio térmico entre la temperatura electrónica  $T_e$  y la temperatura del gas  $T_g$ . Este tipo de plasma es llamado “plasma no equilibrado” [3].

En plasmas generados por descargas bajo una presión menor que varias decenas de [torr], la temperatura electrónica llega a ser alta pero las partículas del gas permanecen relativamente a baja temperatura. Esto se debe a que la frecuencia de colisión entre electrones y partículas del gas es pequeña.

Por lo tanto, los plasmas en estado de no equilibrio térmico son llamados *plasmas fríos*. Las temperaturas en un plasma de este tipo son consideradas como:

$$T_e \gg T_g$$

### 1.5.2 Plasma Térmico Y Equilibrio Termodinámico Local (ETL):

Podemos clasificar los plasmas en: *Plasmas de baja temperatura* y *Plasmas de alta temperatura*, estos últimos se caracterizan por alcanzar temperaturas sobre los 70.000[K], son plasmas aplicados para fusión termonuclear controlada. Los plasmas de baja temperatura van de los 3.000[K] a los 70.000[K] y se dividen en *Plasmas térmicos* y *Plasmas fríos*. Para nuestro objetivo consideraremos los plasmas de alta temperatura y térmicos.

Los plasmas térmicos se encuentran en equilibrio termodinámico y los fríos fuera de éste. Básicamente, en equilibrio termodinámico significa que la

temperatura de los electrones se aproxima a la temperatura del gas ( $T_e \approx T_g$ ). Lo contrario como ya se cito anteriormente para los plasmas fríos que son caracterizados por fuertes desvíos del equilibrio cinético cumplen la propiedad de  $T_e \gg T_g$ . Como la temperatura  $T_g$  es aproximada a la temperatura ambiente, a estos plasmas se les llama “*Plasmas Fríos*”, lo que ocurre en los tubos fluorescentes.

Cabe destacar que un plasma en equilibrio térmico total no puede ser alcanzado en un laboratorio, esto significaría que el dispositivo donde se almacena el plasma y la radiación generada por éste tendrían que estar a la misma temperatura, y hasta el momento no existen materiales que puedan soportan temperaturas tan altas. Por lo tanto es necesario introducir un nuevo tipo de equilibrio, el “equilibrio térmico local” (ETL)( $T_e \approx T_g$ ), en el que existe una región de plasma suficientemente pequeña conteniendo un gran número de partículas. Por lo tanto, un plasma en ETL puede tener gradientes de temperatura y estar localmente en equilibrio [1,3]. Dentro de esta categoría de plasma será incluida la antorcha de plasma, para el objetivo planteado que es la destrucción de desechos hospitalarios a altas temperaturas.

### **1.6 Generación De Plasmas Térmicos:**

La forma usual de producir plasmas térmicos está basada en la utilización de descargas DC, descargas inductivas del tipo RF y microondas (sin electrodos) en medios gaseosos de alta presión.

La temperatura y densidad de partículas cargadas, que son parámetros físicos relevantes en un arco de plasma, pueden variar en un amplio rango. Estos parámetros están determinados por la corriente, la presión y la geometría del arco. En la Figura 5 se muestra la temperatura y densidad de electrones de diferentes tipos de arcos.

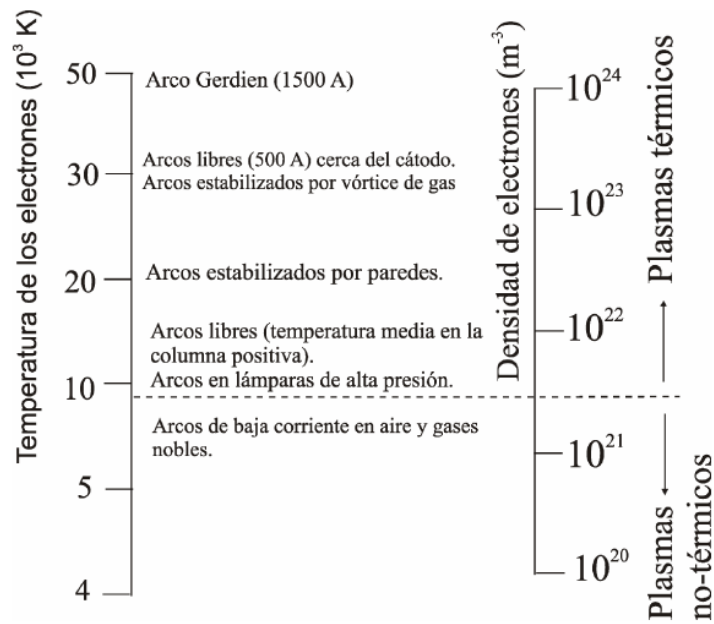


Figura 5 Temperatura y densidades típicas en arcos de plasma a presión atmosférica.

Para las aplicaciones de los arcos eléctricos, es común clasificarlos en función de los mecanismos de estabilización [4] que para nuestro caso será de arco libre de alta corriente cerca del cátodo, donde el arco es auto-estabilizado por el flujo del gas, en donde se pueden alcanzar de los 3.000 a 70.000 [K].

### 1.6.1 Arcos Libres:

Son arcos operados sin ningún mecanismo exterior de estabilización, aunque esto no excluye la posibilidad que el arco pueda desarrollar su propio mecanismo de estabilización. En particular, los arcos de alta corriente (operados con corrientes  $i \geq 50[A]$  a presiones  $p > 0,78[Torr]$ ), son usualmente clasificados como arcos auto-estabilizados si el flujo de gas auto-inducido por la presión magnética es el mecanismo dominante de estabilización. Cualquier variación de la sección conductora del arco (por ejemplo haciendo pasar el arco a través de un tubo constrictor) lleva (debido a la interacción de la corriente con el campo magnético auto-inducido) a un

gradiente de presión magnética que acelera el flujo hasta velocidades  $v \approx 100[m/s]$  para  $i > 100[A]$ .

Ejemplos son los arcos operados a corrientes extremadamente altas (hasta 105 [A]) usados en hornos de fundición. La transición entre arcos de baja corriente y alta corriente, que ocurre a corrientes de  $i > 50 [A]$  a presión atmosférica, se manifiesta por un drástico cambio en la inestabilidad de la columna del arco. Debajo de los 50 [A] la columna está sujeta a movimientos irregulares inducidos por los efectos convectivos libres. Para corrientes en el rango entre 50 a 100 [A] la columna del arco rápidamente se estabiliza por los efectos del flujo convectivo auto-inducido. La estabilización ocurre cuando la velocidad del flujo auto-inducido por los efectos magnéticos  $v_{max} \approx (ij)^{1/2}$  ( $j$  es la densidad de corriente) excede la velocidad del flujo convectivo libre ( $v \approx 1 [m/s]$ ).

### **1.6.2 Arcos Estabilizados Por Paredes:**

Son arcos en general largos ( $l \approx 1[cm]$ ), encerrados en un tubo conductor segmentado de sección circular de pequeño diámetro ( $l \approx 1[mm]$ ). El arco se extiende axialmente en el interior del tubo y cualquier excursión hacia las paredes se compensa por un rápido aumento en el flujo de energía por conducción térmica hacia la pared que enfría el arco localmente reduciendo así la conductividad eléctrica en esa región. Con este tipo de arcos se logran densidades de potencia máximas a  $108 [W/m^2]$ , limitadas por la transmisión máxima de calor hacia las paredes del tubo.

### **1.6.3 Arcos estabilizados por convección forzada:**

Entre varios tipo de estabilización de un arco por medio de un flujo externo de gas, el mecanismo de estabilización por vórtice de gas juega un rol particularmente importante. El arco es confinado al centro de un tubo en que

se inyecta axialmente un intenso flujo vorticoso de gas o líquido. Las fuerzas centrífugas transportan gas relativamente más frío hacia las paredes del tubo, que son protegidas térmicamente de un modo más efectivo. En adición a la componente tangencial del flujo, la componente axial del gas continuamente inyecta gas frío en el sistema. Varios gases, mezclas de gases y hasta líquidos han sido usados como fluidos de trabajo en este tipo de arcos.

### **1.7 Aplicaciones Tecnológicas De Los Plasmas Térmicos:**

Los plasmas térmicos fueron empleados industrialmente desde la década de los 50, y su interés ha crecido sustancialmente en las últimas décadas.

Aplicaciones típicas de esta tecnología incluyen el procesado de materiales (tratamientos térmicos, producción de partes cerámicas, síntesis de compuestos como dióxido de Titanio, así como varias aplicaciones metalúrgicas y de iluminación). Los plasmas térmicos han sido también utilizados para el tratamiento de residuos y otros materiales nocivos desde el punto de vista ambiental, como residuos hospitalarios, destrucción de materiales tóxicos, etc. [5]



**Figura 6 Destrucción de Materiales con Plasma Térmico.**

Estos plasmas térmicos, como ya se mencionara, se generan comúnmente por medio de descargas eléctricas (descargas DC, de radiofrecuencia o microondas), y dado que en muchas aplicaciones se emplea una geometría coaxial de electrodos, y la descarga es “soplada” con un gas a alta presión (para estabilizar la descarga y proporcionar un blindaje térmico a los electrodos), el plasma resultante adquiere la forma de una antorcha (o soplete de muy alta temperatura). Por este motivo, estos dispositivos se denominan *Antorchas de Plasma*, (o Plasma Torches).

Uno de los usos más universalmente extendidos de los plasmas térmicos en el procesamiento de materiales es el corte por arco de plasma, debido a su capacidad para cortar prácticamente cualquier metal y por su alta productividad alcanzada. Las antorchas de plasma para el corte de metales operan con el ánodo de la descarga transferido al exterior (la pieza a cortar). Otro modo de operación de antorchas DC se denomina de arco no transferido (aquí la tobera

es el ánodo de la descarga), y es utilizado por ejemplo, para el rociado térmico de metales sobre diferentes sustratos (plasma spraying)



Figura 7 Corte por plasma térmico.

### 1.8 Descarga de Arco:

Es una descarga *Autosostenida* con una baja caída de potencial en la región catódica, esto se debe a la existencia de mecanismos de emisión de electrones muy eficientes (emisión termoiónica, emisión electrónica por campo y emisión termoiónica por campo) que hacen innecesaria la ampliación de corriente operada en la caída catódica de una descarga glow.

La descarga de arco se puede obtener entre electrodos metálicos, además si dicha descarga transcurre a una presión igual a la atmosférica o mayor; las temperaturas de los electrones, iones y átomos neutros son aproximadamente las mismas y alcanzan un valor del orden de los 6.000 [K], esta temperatura



solo se observa en la parte central del canal del arco, que se encuentra rodeada por una cubierta de gas que es más fría.



**Figura 8 Descarga de Arco eléctrico.**

El arco está caracterizado por corrientes grandes, del orden de 1 a  $10^5$ [A], con densidades de corriente catódica en el rango de  $10^2$  a  $10^8$ [ $A/cm^2$ ]. La caída de voltaje en el arco es baja (de 20 a 30 [V]), y en muchos casos (pero no siempre) la curvacaracterística  $V$  *v/s*  $I$  es de tipo decreciente como se muestra en la Figura 9

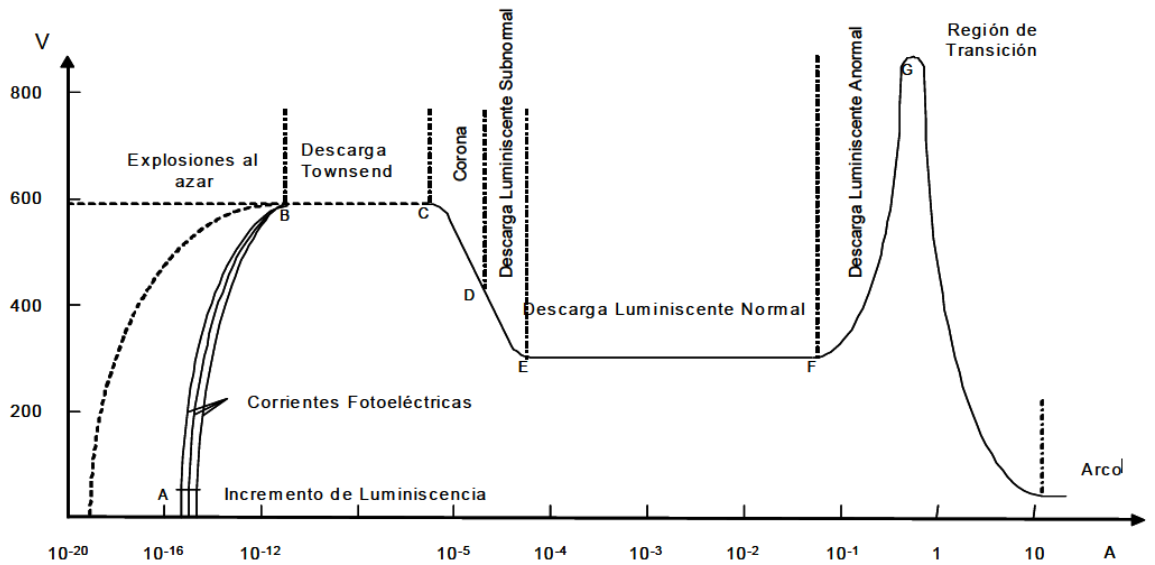


Figura 9 Curva  $V_s^{1/2} / I$  para varios tipos de descarga.

En el gráfico de la Figura 9 se observa que para corrientes del orden  $10^{-18}[A]$  ocurren explosiones al azar las cuales aumentan en tamaño y frecuencia a medida que aumenta el potencial. Si se ilumina el cátodo con luz ultravioleta, la corriente aumenta cerca de  $10^{-13}$  a  $10^{-12}[A]$ ; esto se debe a que la corriente se vuelve más grande con el aumento de la intensidad luminosa. La eliminación de la luz causa reversión y explosiones al azar (**región A-B**).

Si se ilumina el cátodo y el potencial aumenta, la corriente aumenta rápidamente y en un cierto intervalo el potencial aumenta súbitamente. La corriente no cambia si la luz es removida ya que no depende de la fuente externa de ionización y a dicho estado se le conoce como descarga *Autosostenida* y se extiende hasta  $10^{-6}[A]$ . Si se aumenta la corriente hasta  $10^{-5}[A]$  la descarga se vuelve débilmente visible, y el potencial cae hasta un valor constante a una corriente de  $10^{-4}[A]$ . (**Región C-D-E**).

En general no es necesario cumplir todos los procesos para tener una descarga luminiscente. Si se aplica un potencial mayor al potencial de ruptura entre los electrodos, el primer electrón producido al azar, iniciara una descarga autosostenida y el proceso descrito por la curva A-B-C-D tendrá lugar en menos de un segundo.

Cuando la corriente se aumenta más allá de un valor crítico, el voltaje de descarga aumenta, a esta descarga se la conoce como *descarga luminiscente anormal*. Un aumento posterior en la corriente causa al potencial un incremento considerable y a grandes corrientes una caída a muy bajos valores, produciéndose así descargas de arco. El punto en el que ocurre esta transición es de alrededor  $10^{-1}$ [A].

Los cátodos en el arco reciben grandes flujos de energía y alcanzan elevadas temperaturas, a veces sobre toda la superficie catódica, a veces localmente (y por cortos intervalos de tiempo). Como consecuencia, son erosionados y sufren vaporización. El plasma formado por el arco puede estar en equilibrio ( $T_e = T$ ) o no, de acuerdo con la presión del gas en la descarga.

### 1.8.1 Propiedades Del Arco Eléctrico:

El canal del arco entre dos electrodos se caracteriza por tres regiones importantes: *La región catódica*, *La columna de arco* y *la región anódica*. En la **Figura10** se ilustran cada una de las regiones de una descarga de arco.

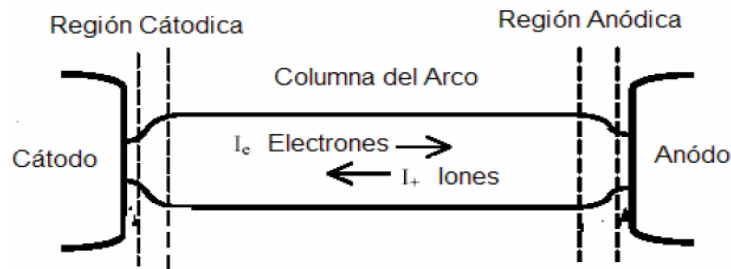


Figura10 Regiones de una descarga de arco.

#### 1.8.1.1 Región Catódica:

El cátodo es cargado negativamente con respecto a la descarga del arco y por lo tanto atrae iones positivos. Sin embargo, puesto que la movilidad de los iones es baja y la corriente eléctrica es llevada por los electrones, el cátodo debe liberar electrones para mantener el flujo de corriente a través de la región oscura del cátodo. Estos electrones son emitidos a través de varios tipos de emisión. Entre ellos los más importantes son:

a) *Emisión termiónica:*

La energía promedio requerida para emitir un electrón de una superficie metálica está dada por la función trabajo y la ecuación de *Richardson - Dushman*:

$$j_e = \frac{4\pi k_B^2 e m_e}{h^3} T^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{k_B T}\right) \quad (1.6.1.1)$$

Donde se tiene que:

$j_e$ : Densidad de corriente.

$T$ : Temperatura en la superficie del cátodo.

$\phi$ : Función de trabajo.

$k_B$ : Constante de Boltzmann.

$e$  : Carga del electrón.

$m_e$ : Masa del electrón.

$h$ : Constante de Planck.

En una descarga gaseosa DC, la corriente es mantenida por la emisión de electrones de la superficie del cátodo. Para extraer un electrón de la superficie se requiere consumir una energía llamada función trabajo  $\phi$  del material, la que es función del estado de la superficie, su contaminación y rugosidad.

La temperatura debe ser suficientemente alta (2.500–4.000[K]) para energizar un electrón y removerlo de su red en la superficie del metal. Una función trabajo baja permite a los electrones ser emitidos a baja temperatura, mientras que una función trabajo muy alta requiere de temperaturas altas.

En el caso de temperaturas muy altas, el material del cátodo tiene una probabilidad alta de erosionarse y derretirse. Para evitar lo anterior es conveniente utilizar un cátodo de tungsteno, ya que dicho material ha incrementado en gran escala el tiempo de vida de los cátodos, que reduce la función trabajo y reduce su erosión. Lo que se presenta actualmente es una aleación de Tungsteno Treado al 2%.

b) *Emisión electrónica por campo:*

Si hay campo presente, los electrones escapan por efecto túnel, la altura de la barrera es del orden  $10^9$ [V/m] y los electrones necesitan viajar a lo largo de diversas trayectorias. Por lo tanto, en vez de pasar la barrera de potencial, los electrones experimentan efecto túnel a través de la barrera. La fórmula de *Fowler- Nordheim* describe lo anterior y se puede ver que la corriente de *tunelamiento* varía exponencialmente con el ancho de la barrera:

$$j_e \approx \exp \left[ -\frac{(2m_e\phi_{eff})^{1/2}}{\hbar} x \right] \quad (1.6.1.2)$$

Donde se tienen que:

$j_e$ : Corriente de tunelamiento.

$\phi_{eff}$ : Altura de la barrera de potencial.

$x$ : Ancho de la barrera.

$m_e$ : Masa del electrón.

$\hbar$ : Constante de Planck.

La contribución principal a la corriente de “*tunelamiento*” viene de los electrones que se sitúan alrededor del nivel de Fermi.

c) *Emisión termoiónica por campo:*

Cuando se aplica un campo eléctrico intenso a una superficie metálica caliente, tanto la alta temperatura como el campo afectan la emisión de electrones [6].

**1.8.1.2 La Columna de Arco:**

La temperatura en la columna de arco es muy alta, de alrededor de 5.000[K] a 20.000[K], a tan altas temperaturas las moléculas de gas se disocian en gran parte en átomos libres. Las velocidades de los electrones y de los átomos son tan altas que la ionización ocurre cuando colisionan entre sí. Al mismo tiempo, también se producen procesos de recombinación donde los electrones y los iones cargados positivamente forman átomos neutros. En equilibrio térmico, usualmente la tasa de ionización está en equilibrio con la tasa de recombinación. El gas se encuentra en estado de plasma y allí existe una gran cantidad de electrones libres e iones positivos. La fracción  $f$  de átomos que son ionizados puede ser calculada por medio de la *ecuación de Saha*:

$$\frac{f^2}{1-f^2} \cdot p = 3,16 \cdot 10^{-7} \cdot T^{5/2} \cdot \exp\left[\frac{eV_i}{k_B T}\right]$$

En donde,

$e$ : Carga del electrón.

$V_i$ : Potencial de ionización del medio gaseoso.

$k_B$ : Constante de Boltzmann.

$p$ : La presión del gas.

$T$ : La temperatura.

Existe un equilibrio de cargas entre los electrones y los iones positivos, como ya se citó, los electrones tienen muchísima más movilidad que los iones positivos, por lo tanto el flujo de corriente se debe a los electrones. El voltaje total del arco, y también el gradiente del voltaje a lo largo del arco, dependen de la magnitud de la corriente, el tipo de gas y la presión.

### 1.8.1.3 Región del Ánodo:

Puesto que el ánodo se carga positivamente, y la corriente es llevada principalmente por los electrones, el ánodo colecta electrones y no necesita emitir portadores de carga. La región del ánodo está dividida en dos áreas: *Una región de confinamiento y una capa anódica*. La capa anódica tiene tres escalas de longitud: el espesor de la capa anódica, el camino libre medio de los electrones y la *longitud de Debye*, tal como se muestra en la

Figura 11.

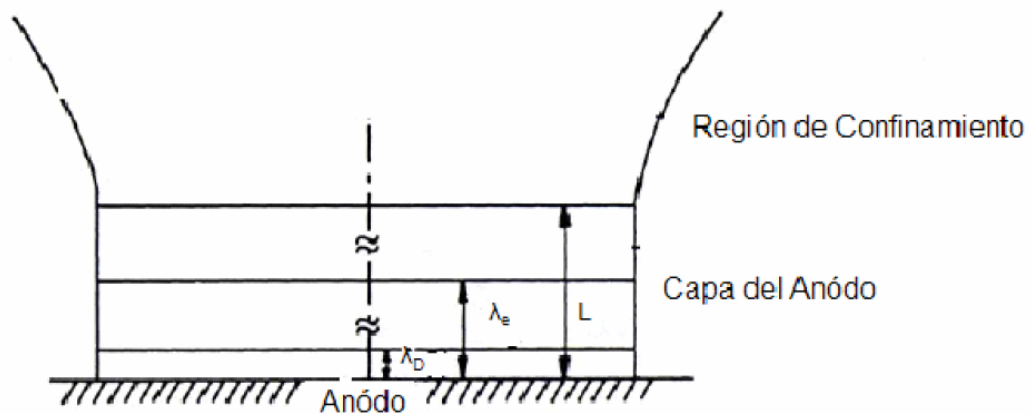


Figura 11. Divisiones de la región del ánodo.

La caída de potencial anódica está compuesta de dos partes: una parte refleja la formación de una capa anódica con carga especial negativa (el ánodo



repele iones). Su magnitud es del orden del potencial de excitación (o ionización) del vapor o átomos de gas, y debe su existencia a la necesidad de producir un leve incremento en la corriente electrónica desde la región del plasma al ánodo.

Existe además una segunda parte que tiene un origen geométrico, y ocurren cuando el área del ánodo es menor que la sección de la región de plasma. Para mantener  $I = n_e \mu_e \cdot E \cdot s$  aproximadamente constante, si  $s$  disminuye se debe aumentar  $n_e$  y  $E$  (se incrementan juntos). La energía que recibe el ánodo en una descarga proviene, principalmente, de los electrones.

Esta energía corresponde a la energía cinética adquirida en la caída anódica más la energía de ligadura liberada al recombinarse (la función trabajo  $\phi$ ). Esto corresponde aproximadamente 10 [eV] por electrón, suficiente para elevar la temperatura del ánodo hasta varios miles de grados.

### **1.8.2 Iniciación de un Arco:**

La forma más sencilla de iniciar un arco es conectar los electrodos a una fuente de potencia capaz de proveer una corriente suficientemente alta, comenzar con los electrodos en contacto, y luego separarlos. Los electrodos se encuentran muy calientes en el punto de contacto y vaporizan parcialmente material metálico, de forma tal que al separarse el arco se desarrolla en el vapor metálico (usualmente más fácil de ionizar que el gas). Otra forma de iniciar un arco es aplicar un pulso de alta tensión capaz de producir la ruptura eléctrica del gas en el espacio entre los electrodos.

También puede focalizarse sobre la superficie del cátodo un pulso láser intenso (con energías  $\geq 10$  [mJ]) para producir una descarga auxiliar que “cortocircuita” el gap y desencadena la descarga principal.[6]

### 1.8.3 Potencial de Ruptura:

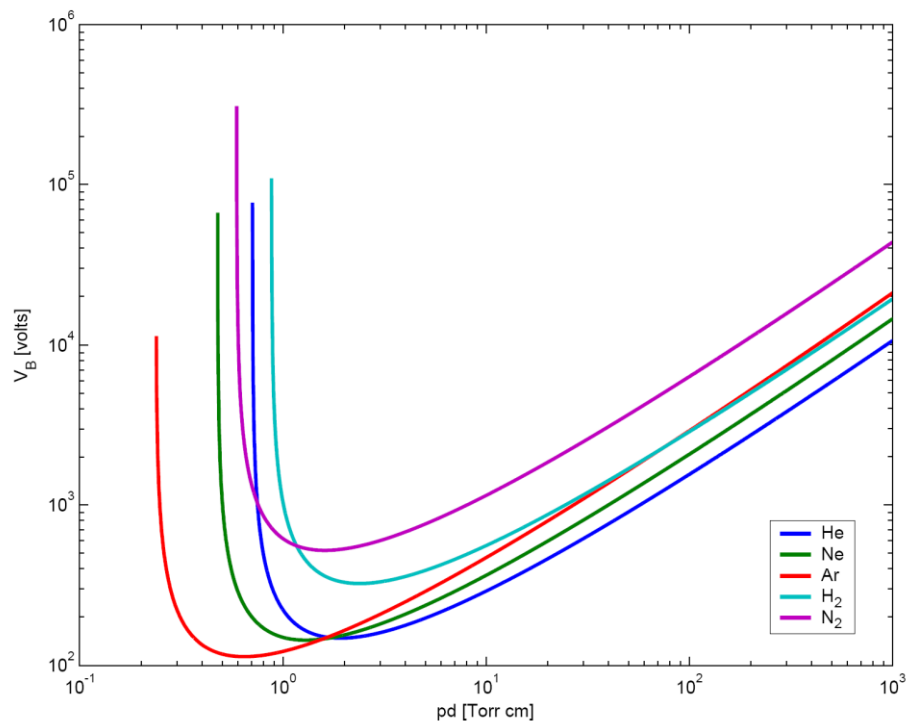
Este es el mínimo potencial para hacer que el gas sea eléctricamente conductor. En condiciones de presión atmosférica el gas se comporta altamente aislante por lo que se requiere de una aplicación de voltaje significativo para hacer que este gas logre ser completamente ionizado, es decir hacerse conductor. Este potencial de Ruptura  $V_B$  puede ser determinado por la *Ley de Paschen*, la que define la siguiente ecuación,

$$V_B = \frac{apd}{\ln(pd) + b} \quad (1.6.3.1)$$

Donde  $V$  es la tensión disruptiva en *Volts*,  $p$  es la presión (en atmosferas), y  $d$  es la distancia (en metros) entre los electrodos (gap). Las constantes  $a$  y  $b$  dependen de la composición del gas.

Por ejemplo para el aire se tiene que presión atmosférica estándar  $1[atm]$ ,  $a = 4.36 \times 10^7 V/(atm \cdot m)$  y  $b = 12.8$ .

El gráfico representativo de la ecuación (1.6.3.1) es la *curva de Paschen*. Ésta predice la existencia de una tensión disruptiva mínima para un determinado producto de la presión y la separación de los electrodos.



**Figura 12 Curvas de Paschen correspondientes a distintos tipos de gases.**

Ref: [wikipedia.org/Paschen's law](http://wikipedia.org/Paschen's law)

En la Figura 12 se puede observar que la curva desciende para pequeños valores de  $Pd$  y luego asciende para valores más grandes. En la región cuando la “Curva de Paschen” decae, se observa que a mayor presión (o distancia) es más difícil el encendido. En la región ascendente se observa lo opuesto, cuanto mayor es la presión (o distancia) es más fácil el encendido.

Para producir la descarga eléctrica, la energía que se suministre a los electrones debe ser tal que permita la ionización de los átomos del gas al colisionar con ellos.

Partiendo de un valor mínimo de voltaje de ruptura mínimo  $V_{b_{min}}$ , “d” constante y aumentando la presión, la densidad del gas aumenta, por lo tanto, se generan más colisiones entre los electrones y átomos en el gas, pero esto

no significa que obtengan la energía necesaria ya que el recorrido de los electrones no es suficiente, por lo que es necesario aplicar un campo eléctrico externo para que dichos electrones obtengan esta energía para ionizar los átomos del gas.

Si se disminuye la presión a “d” constante, los caminos libres de los electrones aumentan, por lo que la energía cinética que ganan en su recorrido es mayor, pero el número de colisiones es pequeño ya que la densidad es baja en el gas, por lo tanto, no se forma la avalancha electrónica, entonces será necesario aumentar el nivel del voltaje para producir esta avalancha [8].

## II) Antorchas De Plasma Y Sus Aplicaciones:

### 2 Antorcha De Plasma

Los plasmas térmicos son producidos por dispositivos conocidos por Antorchas de plasma o plasmatroneos. Dependiendo de la fuente primaria, pueden ser de corriente continua, corriente alterna o radiofrecuencia. Estas son conocidas como Antorcha DC, SC o RF.

Una antorcha convencional consta de un cátodo de tungsteno en forma de varilla y un ánodo de cobre en forma de tobera enfriado con agua. El par de electrodos están separados por un aislador por el que ingresa el gas.

Cuando el gas es introducido entre la separación de los electrodos y un arco de CC es estabilizado entre los electrodos, este es empujado a través de la tobera dando como resultado una llama de alta velocidad con una alta temperatura (Chorro de Plasma).



Figura 13 Antorcha de Plasma. Ref: Pyrogenesis Engine.

El cuerpo de la antorcha consiste en cámaras de enfriamiento para el cátodo y el ánodo. Estas son variables para antorchas que se basan en distintas formas de estabilización de arco, geometría de los electrodos, gas de plasma, enfriamiento de electrodo y tipo gas de flujo.

El chorro de plasma puede ser operado en un modo de Arco transferido y uno No transferido, dependiendo si el arco es transferido directamente a la pieza de trabajo o no, como se muestra en la Figura 14.

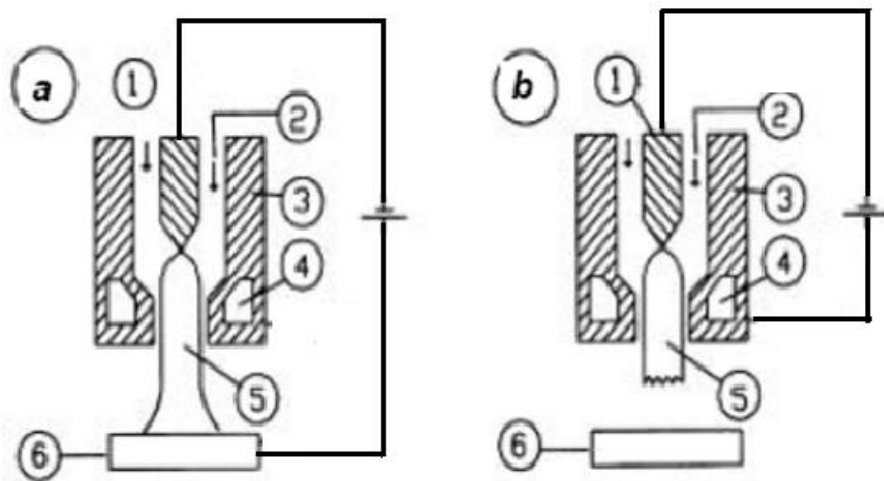


Figura 14 Antorchas de Plasma en operación de modo arco (a) Transferido y (b) No Transferido.  
Ref: Tese de maestreado "Estudo De Tochas De Plasma Através Da Teoriada Similaridade"

## 2.1 Estabilidad Eléctrica De La Antorcha De Plasma En Relación Con La Fuente De Poder:

La operación de una antorcha de plasma en un circuito eléctrico en donde se tiene también una fuente de potencia, depende de las características estáticas, tanto de la fuente de potencia como de la antorcha. Cada uno de esos dipolos como se muestra en la Figura 15 tiene su propia característica.

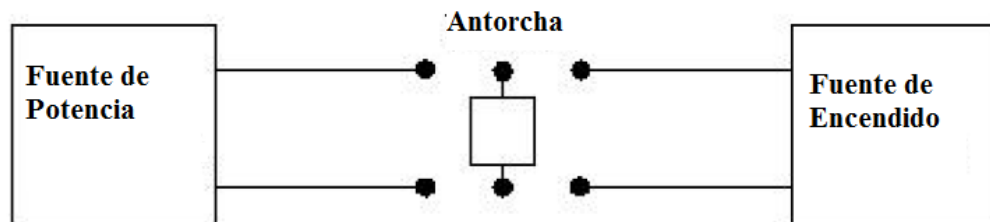
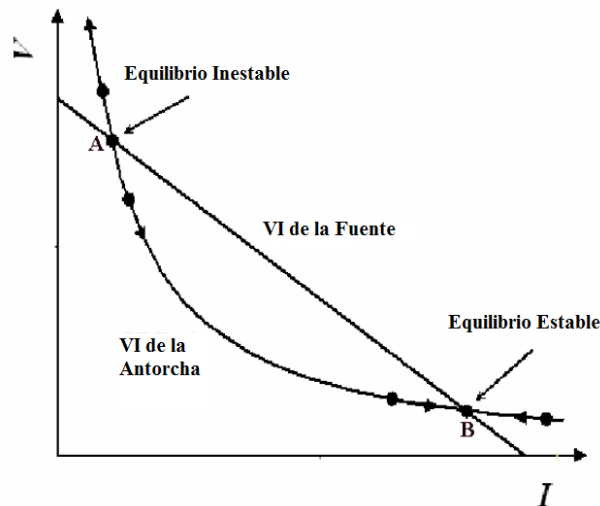


Figura 15 Diagrama de los dipolos conectados

La operación de ambos dipolos en conjunto se producirá en el punto de intersección de sus características. Se observa en la Figura 16, las características de la fuentes (dadas por línea de carga) y de la antorcha (de característica descendente). Se tienen dos puntos de intersección *A* y *B* donde la antorcha opera solamente en el punto *B* (Punto estable) y el punto *A* el cual será inestable.

Si consideramos la vecindad del punto *A* a la izquierda de la curva correspondiente a la antorcha, la tensión de la fuente correspondiente es menor a la requerida por el arco, luego el arco se extinguirá. Mientras que a la derecha de *A* ocurrirá lo contrario, la tensión de la fuente es mayor a la requerida por el arco, y luego la corriente tenderá a aumentar en el sentido que indica la flecha, por lo tanto, el punto *A* es inestable.

Análogamente, en la vecindad del punto B a la izquierda, en la curva de la antorcha, la tensión de la fuente correspondiente es mayor que la requerida por el arco, luego el arco tenderá a un punto de mayor corriente (Punto B), como indica la flecha. A la derecha del punto B ocurre lo contrario, la tensión de la fuente es menor a la requerida por el arco y luego la corriente tenderá a disminuir en sentido del punto B, también indicado por la flecha, por lo tanto el punto B es estable.



**Figura 16 Estabilidad eléctrica del punto de operación del arco con característica descendente.**  
**Ref: Tese de maestreado "Estudo De Tochas De Plasma Através Da Teoriada Similaridade"**

En resumen las condiciones de estabilidad del punto de funcionamiento según la siguiente ecuación:

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{fuente} < \left. \frac{dV}{dI} \right|_{antorcha} \quad (2.1.1)$$



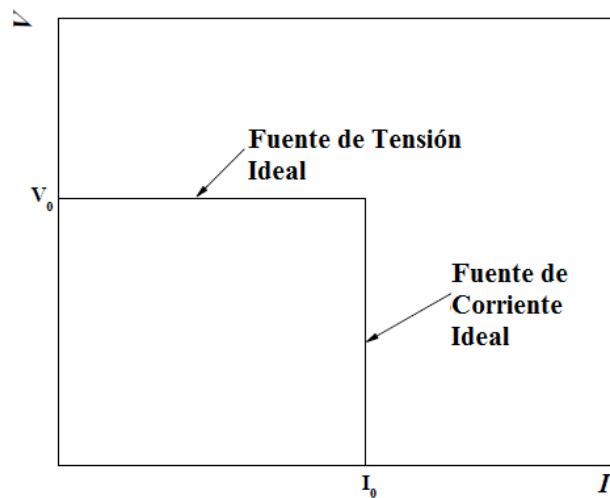


Figura 17 Diagrama esquemático de la fuente ideal de tensión y corriente. Ref: Tese de maestreado “Estudo De Tochas De Plasma Através Da Teoriada Similaridade”

Una Antorcha de características descendentes necesita de una fuente de corriente para operación estable, mientras que una antorcha de características ascendentes necesita de una fuente de tensión y una fuente de corriente como se muestra en Figura 17. Por lo tanto, una Antorcha de características descendentes no podrá operar con una fuente de tensión

## 2.2 Encendido Del Arco En Una Antorcha De Plasma:

En la Figura 15 se muestra un diagrama esquemático de tres dipolos ligados entre sí, fuente de potencia, Antorcha y fuente de encendido. Para iniciar un arco se debe contar con:

a) Una fuente de potencia para el arco aplicado a la antorcha, esto es, antes del encendido se debe tener una tensión DC entre los electrodos, para que el encendido sea sustentable (por medio de la fuente) formando el arco a par de una ionización inicial (encendido por chispa).

b) Pequeña separación entre los electrodos, para disminuir la tensión de ruptura necesaria.

c) La fuente de encendido. Son varias las técnicas usadas para iniciar el arco de una antorcha:

1. Alta tensión (HV).
2. Alta frecuencia (HF)
3. Encendido Mecánico
4. Gas de baja tensión de ruptura (Ar, mezcla de Ar/Ne)
5. Arco auxiliar de baja corriente,

El encendido más común es con una fuente de HV/HF (caso 1 y 2), con o sin inyección de gas de baja ruptura (caso 4).

### **2.3 Electrodo:**

Con respecto a los ánodos, éstos son siempre fríos, mientras que los cátodos pueden ser calientes o termoiónicos, fabricados con materiales de alta temperatura de fusión. En general, para las antorchas de plasma son usados los siguientes cátodos calientes; Tungsteno (3.698 K) utilizado para gases neutros (Argón) y reductores ( $H_2$ ); Cátodos termoiónicos, Zirconio (2.128 K) y Hafnio (2.423 K), para gases oxidantes (Argón,  $N_2$ , etc.).

Para los cátodos fríos, en general se usa el cobre (bajo punto de fusión; 1.356 [K]), usados en antorchas de alta potencia.

En general, en cátodo es de mayor preocupación por la alta densidad de flujo térmico y densidad de corriente a los que se ve sometida. La erosión de los electrodos está directamente vinculada al arco, ésta puede ser confinada o difusa, sin embargo una mínima erosión es muy difícil de conseguir. Lo normal y práctico para conseguir la mínima erosión es que el cátodo mantenga un comportamiento confinado e inmóvil, además considerar un cátodo de tungsteno ya que sometido a altas temperaturas, es decir hasta 3.600 [K] alcanza un funcionamiento ideal.

Se sugiere adicionar un 2% de Torio para reducir la función trabajo del tungsteno de 4,5[V] a 2,6[V] para el tungsteno toreado. Ya que como se cito anteriormente para el buen funcionamiento de un electrodo caliente debe tener una baja función trabajo  $\varphi$ .

Ya descritas las bases necesarias para llevar a cabo el diseño de una antorcha de plasma, se concluye este capítulo para luego ser retomado al final de esta tesis en conjunto con los planos, detallando y justificando la elección de las variables de medida, materiales y configuración de este dispositivo.

A continuación se detalla el tema de los desechos hospitalarios en Chile, los que serán la justificación del estudio y diseño de una antorcha de plasma para ser implementada en Chile con el fin de la destrucción de éstos.

### **III) Desechos Hospitalarios en Chile:**

#### **3 Conceptos Generales Sobre Desechos:**

El término desecho es utilizado como "aquel objeto movable que se ha dejado de usar directamente o aquel que se descarga o bota permanentemente". En los hospitales o centros de salud, clínicas, consultas médicas, etc. Incluyen los residuos clasificados como Residuos Peligrosos, Residuos Radioactivos de baja Intensidad, Residuos Sólidos asimilables a domésticos y Residuos Especiales. Cada Unidad, Sección, Servicio u Oficina del Hospital se constituye en una ZONA DE GENERACIÓN DE RESIDUOS. Cada Zona de Generación debe categorizar sus residuos según la clasificación, para posteriormente ser almacenados y transportados según su rotulación, esto significa el color del contenedor y/o bolsa en la cual se dispone:

*RESPEL = Residuos Peligrosos, Rojo*

*RESRAD= Residuos Radioactivos, Amarillo*

*RESDOM = Residuos Asimilables a Domésticos, Negro o Gris.*

#### **3.1 Caracterización De Los Desechos Hospitalarios:**

Según la Actualización Norma Saneamiento Ambiental Básica Oficina Calidad y Seguridad del Paciente del año 2008 entregada por el Ministerio de Salud de Chile se estima que entre un 75% y un 90% de los desechos originados en instituciones de salud carece de riesgo alguno y es de por sí asimilable a los desechos domésticos, y que un 10% a 25% sería potencialmente dañino. El material corto-punzante no superaría el 1%, y más pequeña aún sería la proporción de agentes *citotóxicos* y *radionúclidos*.

Documentos de la OMS dividen los desechos hospitalarios, de los que cabe preocupación especial en las siguientes categorías:

*Desechos infecciosos*: Son los que se sospecha que contienen patógenos (agentes que pueden producir daño o enfermedad al humano) en suficiente cantidad o concentración, en general estos se presentan en tejidos o materiales contaminados con sangre o fluidos biológicos de pacientes infectados.

*Desechos patológicos*: Estos se refieren a tejidos, órganos, partes del cuerpo, fetos, sangre y fluidos corporales como también cadáveres animales. Las partes del cuerpo reconocibles se incluyen dentro de esta categoría como Desechos anatómicos.

*Desechos Corto-punzantes*: Todo elemento que puede causar corte o pinchazo.

*Desechos farmacéuticos*: Productos farmacéuticos, drogas, vacunas y sueros expirados, sin uso, derramados o contaminados que no van a ser utilizados, así como los materiales desechables utilizados para su manipulación y envasado (guantes, envases con residuos, etc.).

*Desechos genotóxicos*: Son desechos con propiedades mutagénicas (químicos que alteran la información genética), teratogénicas (drogas que generan malformaciones en los fetos) o carcinogénicas (químicos que pueden producir cáncer). Los principales exponentes son las drogas citotóxicas antineoplásicas las que provocan muerte celular u omiten la proliferación de éstas, se pueden presentar en materiales contaminados con ellas, residuos en envases, secreciones y heces de pacientes tratados, etc.

Desechos químicos: Pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Se consideran peligrosos si poseen alguna de las siguientes propiedades: tóxicos, corrosivos, inflamables, reactivos (ej. explosivos) o genotóxicos.

Desechos con alto contenido en metales pesados: Se tratan de una Subcategoría de los anteriores. Se refiere especialmente a instrumentos a base de mercurio desechados (termómetros, esfigmomanómetros).

Contenedores presurizados: Tratan especialmente latas aerosoles. Estas pueden explotar por efecto del calor o al ser puncionados accidentalmente.

Desechos radioactivos: Incluye todos los materiales sólidos, líquidos y gaseosos contaminados con radionúclidos de fuentes abiertas (las fuentes selladas nunca se eliminan al medio externo directamente).

El manejo y la disposición final de los desechos hospitalarios ha sido objeto de atención en todo el mundo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha realizado reuniones de expertos para analizar la materia y ha difundido recomendaciones específicas para países en vías de desarrollo considerando que en los países desarrollados las Normas de Bioseguridad en hospitales son cumplidas con suma rigurosidad, a diferencia de los países como el nuestro donde dichas normas son desconocidas y/o tomadas a la ligera, además postulan que la gran mayoría de los residuos generados por las instituciones de salud se asimilan a los desechos domésticos, y por lo tanto, no merecen un manejo especial, salvo casos específicos como los elementos radioactivos, los agentes *citotóxicos*, y otros de connotaciones especiales como los restos humanos identificables a simple vista. En consideración de esto, el manejo inadecuado de los residuos tiene impactos presentes y futuros. Según la

Política de gestión integral del primer reporte sobre residuos sólidos elaborada por CONAMA (2005a), el país da muestra de un conjunto de falencias en los temas relativos al manejo de los residuos sólidos. Se constata la falta de conciencia ambiental de la ciudadanía, un marco regulatorio incompleto y la existencia de una normativa dispersa, además de fiscalización insuficiente o mal gestionada.

Sobre el manejo de los desechos hospitalarios en Chile por la citada controversia debe considerarse el impacto económico que las decisiones en esta materia pueden tener para el sistema público de salud, ya que justifican una evaluación objetiva de los riesgos asociados a los desechos hospitalarios para la población y a la adopción de medidas de protección efectivas en los casos en los que la evidencia científica y epidemiológica lo sugiera. El análisis debe considerar también los aspectos sociales y culturales que pueden incidir en la toma de decisiones en este ámbito, y el estado de situación de la disposición de desechos en Chile en lo que sea pertinente.

Los desechos hospitalarios forman parte de los desechos sanitarios, estos últimos incluyen además los provenientes de clínicas y consultas médicas, de centros ambulatorios, de clínicas dentales, de laboratorios, de centros de investigación, de los cuidados de salud domiciliaria (pacientes diabéticos, tratamientos ambulatorios de cuadros agudos por vía intravenosa o intramuscular, etc.), de oficinas donde se practica atención de enfermería, y de centros de diálisis, entre otros.

En términos generales, las fuentes “extra-hospitalarias” de desechos sanitarios son tanto o más importantes que los hospitales, no sólo por el volumen que representan, sino también porque la capacidad de control sobre ellas es baja, en la gran mayoría se le trata como un residuo doméstico.

Estudios epidemiológicos indican que una persona que se lesiona con una aguja utilizada con un paciente tiene un 30%, un 1,8% y un 0,3% de probabilidades de resultar infectado de la hepatitis B (VHB), virus de la Hepatitis C (VHC) y el virus de inmunodeficiencia humana (VIH), respectivamente, según la OMS en la *“Gestión sin Riesgo a los desechos originados por la atención de la Salud”*. La diferencia se explica en parte por la mayor viabilidad de los virus en el ambiente y por la inefectividad inherente de cada agente. El VHB es muy persistente en el aire seco y puede sobrevivir varias semanas sobre una superficie, también es resistente a exposiciones breves a agua hirviendo; el virus puede sobrevivir varias semanas sobre una superficie, también es resistente a 10 horas a una temperatura de 60°C. Una dosis infectante de VHB o VHC también puede sobrevivir hasta una semana en una gota de sangre atrapada en una aguja hipodérmica. En contraste el VIH no sobrevive más de 15 minutos al ser expuesto al etanol 70% y sólo 3 a 7 días a temperatura ambiente; el virus es inactivo a 56°C.

Del total de infecciones anuales por el VHB en Estados Unidos, se ha calculado que el 0,05% pueden ser atribuibles al contacto con residuos cortopunzantes; en tanto <0,003% de las infecciones anuales por VIH pueden relacionarse al contacto con este tipo de residuos.

Debemos reconocer entonces que la gran mayoría de los desechos hospitalarios tradicionalmente considerados peligrosos se hallan presentes también en forma importante en los desechos domésticos o municipales, lo grave es que estos últimos no son sometidos a medidas preventivas de neutralización ni de protección física (ej. uso de contenedores apropiados para el material corto-punzante). De esto se deduce que el eje central de las estrategias de manejo de los desechos hospitalarios debe ser la identificación de aquellos elementos que ofrecen un riesgo especial para la población, como



también tan importante, para los operadores de basura, como para justificar la adopción de medidas de protección específicas.

El impacto económico de las decisiones tomadas sobre esta materia con respecto al sistema de salud público, justifican una evaluación objetiva de los riesgos reales asociados a los desechos hospitalarios para la población, y a la adopción de medidas de protección efectivas en casos de argumentos científicos y epidemiológicos así lo sugieran. El análisis debe considerar también los aspectos sociales y culturales que pueden incidir en la toma de decisiones en este ámbito, y el estado de situación de la disposición de desechos en Chile en lo que sea pertinente.

En particular, los residuos generados en centros hospitalarios presentan una preocupación a nivel mundial [7], desde la potencial propagación de enfermedades hasta los riesgos ambientales debido a los métodos empleados para su tratamiento y disposición final. Existen también riesgos por la dificultad asociada a su manejo, por el carácter infeccioso de algunas de sus fracciones componentes, y la presencia frecuente de objetos corto-punzantes.



**Figura 18 Disposición final ilegal de los desechos hospitalarios en Cabrerro; Fuente: Diario Universidad de Chile, “Denuncia de vertedero ilegal de Residuos hospitalarios en Ruta 5 Sur (Cabrerro)”;** Julio 2012.

### **3.2 Definiciones Reglamentarias Vigentes En Chile:**

El “Reglamento de Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo” decretado por el Ministerio de Salud de Chile en 1999 (Decreto N°594) define como Residuo industrial “todo aquel residuo sólido o líquido, o combinaciones de éstos, provenientes de los procesos industriales y que por sus características físicas, químicas o microbiológicas que no puedan asimilarse a los residuos domésticos.”

El mismo reglamento, entre un total de 35 tipos de sustancias o residuos, reconoce la existencia de los siguientes residuos industriales peligrosos relacionados con la atención hospitalaria, tales como:

Desechos clínicos; Medicamentos y productos farmacéuticos, como también Sustancias infecciosas.

Finalmente, el documento indica que “Para efectos del presente reglamento se entenderá por sustancias tóxicas, corrosivas, peligrosas, infecciosas,

radiactivas, venenosas, explosivas o inflamables aquellas definidas en la Norma Oficial NCh 382.of98.”

Dicha norma, que trata sobre “**Sustancias peligrosas**”, identifica las “*Sustancias venenosas (tóxicas) y sustancias infecciosas*”, y define cada una de ellas como sigue:

**Sustancias venenosas (tóxicas):** Son sustancias que pueden causar la muerte o lesiones graves que pueden ser nocivas para la salud humana y/o animal si se ingieren o inhalan, como también si entran en contacto con la piel.

**Sustancias infecciosas:** Son sustancias que contienen micro-organismos viables o toxinas de micro-organismos de los que se sabe, o se sospecha, que pueden causar enfermedades en los animales o en el hombre.

#### **4 Manejo De Desechos Hospitalarios En Chile:**

El sistema de manejo de residuos sólidos debe poner en marcha una serie de operaciones utilizando la tecnología apropiada para satisfacer dos objetivos fundamentales que según CEPIS (El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente ,1994) son:

- Controlar los riesgos para la salud que podría ocasionar la exposición a residuos sólidos hospitalarios de tipo infeccioso o especial.
- Facilitar el reciclaje, tratamiento, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos sólidos hospitalarios, en forma eficiente, económica y ambientalmente segura.

Los beneficios asociados a un adecuado manejo de residuos corresponden a Incrementar los niveles de seguridad para la salud de personas externas e internas al establecimiento de salud, reducir el impacto ambiental por mala disposición de los residuos, aprovechamiento de materiales reciclables como materias primas, mejora de las condiciones ambientales y estéticas del establecimiento de salud y optimizar los costos por disposición de residuos.

Para realizar un manejo adecuado de residuos es importante conocer la composición y cantidad de los residuos generados en el centro de salud [11].

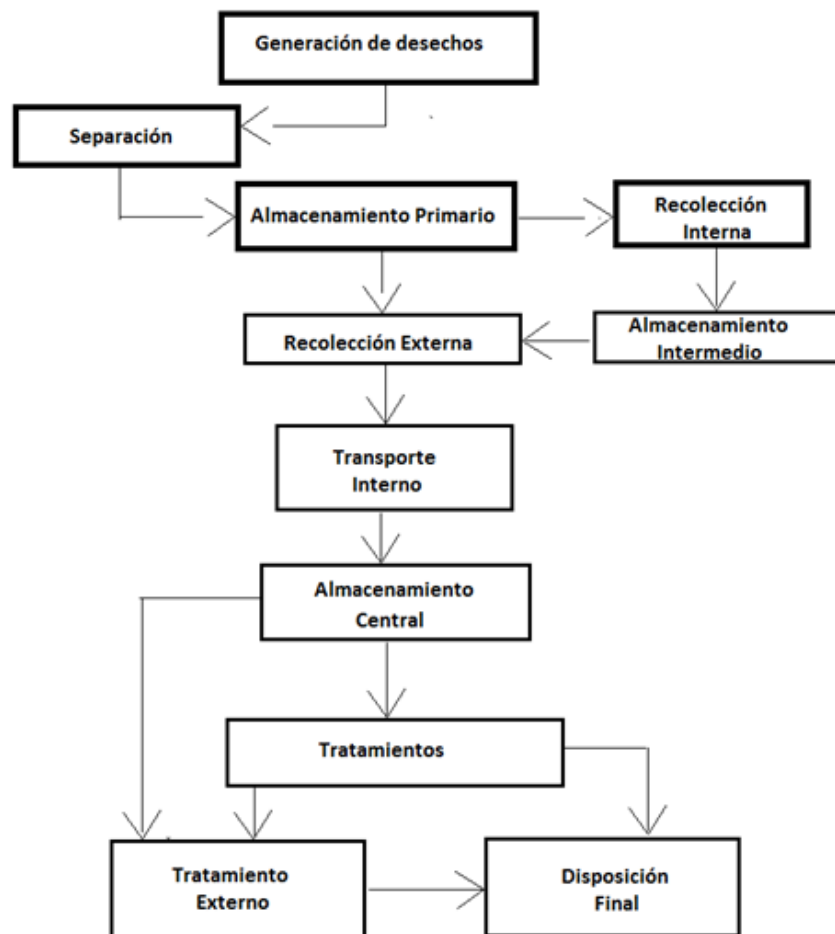


Figura 19 Etapas del manejo de residuos. Elab. Propia.

#### **4.1 Descripción De Las Etapas Del Manejo De Residuos**

A continuación se describe de manera general cada una de las etapas que involucra un manejo de residuos hospitalarios.

**Generación De Desechos:** Son todos los residuos que se producen por las actividades y procedimientos realizados en las distintas unidades del centro de salud. Esta no es una etapa en si de un plan de manejo, pero es lo que inicia el manejo de residuos.

**Separación:** Es la base fundamental del adecuado manejo de residuos, y es la operación más importante ya que requiere de la participación activa y consciente de toda la comunidad hospitalaria. Consiste en separar y colocar en recipientes adecuados, cada uno de los residuos generados inicialmente en las distintas unidades, de acuerdo a sus características y atendiendo a una clasificación específica.

Esta etapa de segregación permite diferenciar disposición y tratamientos para cada tipo de residuos, reducir costos por tratamientos y minimizar los riesgos potenciales tanto para el personal interno del centro de salud, como para la población en general.

**Almacenamiento:** Existen diferentes tipos de almacenamiento según el centro de salud del que se trate y la complejidad del recinto. Como se muestra en la Figura 19 Etapas del manejo de residuos conceptual se divide en dos etapas.

**1) Almacenamiento Primario** (en el lugar de origen): Consiste en la acumulación o acopio de los residuos ya segregados en el lugar en donde se producen los residuos, en esta etapa estos son dispuestos según su clasificación en recipientes y bolsas específicas para cada uno de ellos. Este almacenamiento se realiza antes de la recolección interna por lo tanto es temporal. Se debe considerar que este acopio se encuentra dentro de las unidades de atención directa al paciente por lo que se deben tomar todas las precauciones para evitar riesgos en la salud de las personas.

**2) Almacenamiento Intermedio:** Es el cual se realiza en pequeños centros de acopio, distribuidos estratégicamente en los pisos o unidades de servicios. Estos reciben las bolsas selladas y rotuladas desde el almacenamiento primario, después de la recolección interna. Estos sitios deben reunir condiciones para facilitar el almacenamiento seguro (áreas restringidas, pisos y paredes lavables, contar con contenedores adecuados, buen acceso para el personal de recolección, etc). Este lugar de acopio también es temporal y en ellos se debe mantener el orden, seguridad y comodidad para el personal de salud, pacientes y para el público en general.

**3) Almacenamiento Central O Final:** Es el lugar en donde se acopian todos los residuos provenientes del establecimiento de salud. Estos permanecen en ese lugar hasta ser tratados internamente o hasta el retiro externo, ya sea por entes privados o municipales. Al recibir grandes volúmenes de residuos este centro de acopio debe encontrarse lo más aislado posible de las unidades de la Institución, específicamente de áreas de atención al paciente, áreas de alimentación y laboratorios. Este centro de almacenamiento debe ser exclusivo para este fin y contar con accesos para vehículos recolectores, contenedores

adecuados según la clasificación de residuos, y cumplir con medidas de seguridad que impidan el acceso de personas ajenas al lugar.

**4) *Recolección:*** Etapa de retiro de los residuos en bolsas y contenedores desde los lugares de origen, hasta el lugar de almacenamiento temporal destinado para ello. Este retiro lo puede realizar personal interno del hospital o de empresas externas. Generalmente, el retiro o recolección se realiza por dos vías o flujos: el horizontal, mediante transporte manual o en carros de preferencia metálicos, y el flujo vertical, mediante transporte en ascensores, escaleras, montacargas y mangas (MIDEPLAN, 1996).

**5) *Transporte Interno:*** Consiste en el traslado de los residuos después de la recolección desde los lugares de origen al lugar de almacenamiento central que se encuentra dentro del establecimiento de salud. Este se efectúa generalmente en carros o contenedores adecuados para ello, aunque en algunas ocasiones se realiza manualmente. Para el transporte de los residuos es necesario generar rutas de traslado y horarios específicos para ello, estas rutas deben cubrir la totalidad del establecimiento y evitar coincidir con el tránsito de personas, pacientes y otros servicios del centro de salud.

**6) *Tratamiento:*** Consiste en la aplicación de métodos o procedimientos destinados a eliminar, acondicionar o reducir los residuos para su posterior disposición. Entre estos podemos mencionar compactación, incineración, desinfección y esterilización en autoclave. (MIDEPLAN,1996)

**7) *Transporte Externo:*** Está destinado a trasladar los residuos tratados o no, a su lugar de disposición final, ya sea en vehículos propios del servicio o vehículos externos. Los vehículos deben ir por lo menos cubiertos y en caso de

transportar residuos peligrosos deben contar con las medidas de seguridad adecuadas para su transporte. (MIDEPLAN,1996)

**8) Disposición Final:** Es la etapa final del manejo de residuos y consiste en localizar los residuos en forma permanente. Esta puede ser en rellenos sanitarios, fosas digestoras, ventas, reciclaje, etc. Esta etapa no necesariamente se realiza después del transporte externo, debido a que puede haber residuos que tienen su disposición final dentro del establecimiento.

El manejo de residuos dentro de los establecimientos de salud ha recobrado gran importancia a nivel mundial, debido a las preocupaciones medioambientales y de salud ocupacional. En el país este tema se ha desarrollado paulatinamente y aun presenta muchas deficiencias con respecto a las políticas y la legislación asociada, la que es fundamental para la realización de nuevas actividades, que fomentan la protección de las personas y del ambiente.

## **5 Tratamientos Para Los Residuos Hospitalarios:**

La finalidad de cualquier sistema de tratamiento es eliminar las características de peligrosidad de los residuos hospitalarios para que después del tratamiento, no presenten más riesgo para la salud pública que los desechos comunes.

Cualquier sistema de tratamiento para los residuos tiene que cumplir con los requisitos básicos siguientes:

Asegurar la destrucción total y completa de todos los gérmenes patógenos presentes, incluyendo los que se encuentran al interior de agujas, jeringas, catéteres, etc.; No ocasionar problemas al medio ambiente con emisiones



gaseosas, descargas líquidas y sólidas; Ser de segura y comprobada tecnología, así como también de práctico funcionamiento y mantenimiento

Además, son factores deseables, permitir una reducción del volumen de los desechos tratados. Lograr que las partes anatómicas o semejantes, (desechos de cirugía), sean irreconocibles e irrecuperables. Es importante también que mediante el tratamiento se logre una transformación irreversible de los diferentes objetos, y así de evitar la reutilización clandestina de los artículos que puedan tener valor comercial.

### **5.1 Sistemas De Tratamientos Más Conocidos Actualmente Para Residuos Hospitalarios:**

Actualmente los sistemas de tratamiento más conocidos para los residuos hospitalarios son:

*Desinfección Por Tratamiento Químico.*

*Desinfección Por Tratamiento Térmico.*

*Desinfección Por Microondas.*

*Desinfección Por Irradiación.*

*Incineración.*

La desinfección consiste en eliminar los microorganismos patógenos presentes en los desechos bio-infecciosos. Se diferencia de la esterilización en que esta última implica la destrucción de todos los microorganismos presentes.

La desinfección puede lograrse por medio de procesos químicos y térmicos, por microondas o por irradiación. Dependiendo del tipo de desinfección y de su eficacia, los desechos bio-infecciosos pierden su peligrosidad y pueden, por lo tanto, ser manejados como residuos comunes [11].

### 5.1.1 Desinfección Química:

Proceso de destrucción de los patógenos provocada por la acción química de ciertos compuestos (Figura 20).

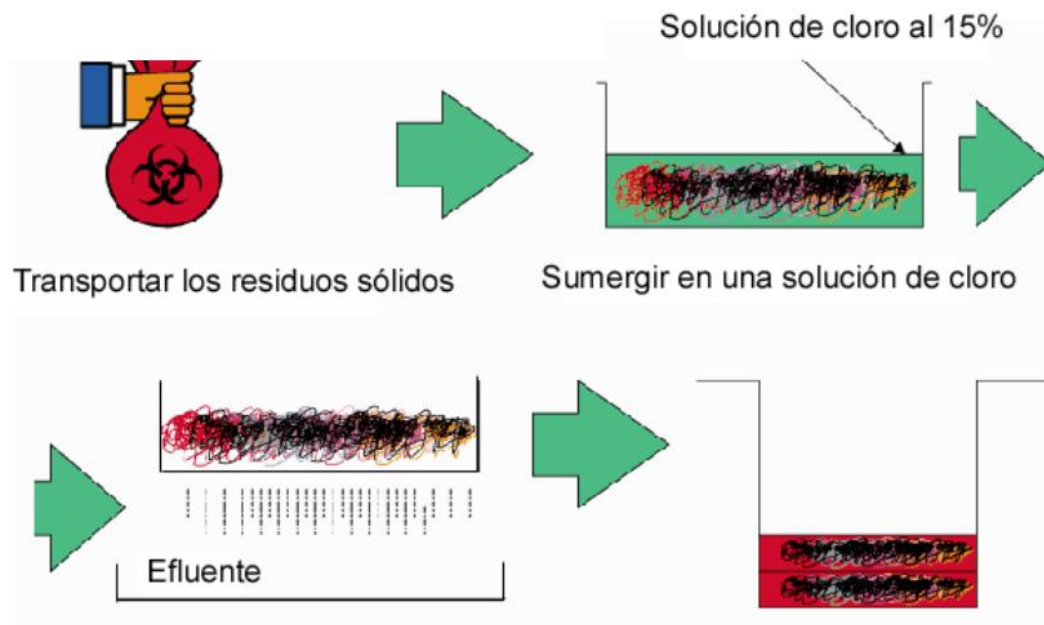


Figura 20 Proceso de desinfección Química.

Esta tecnología es útil para establecimientos de salud cuya generación no excede de 10[kg] diarios. Con esta técnica se logra la desinfección del residuo por contacto con un producto químico líquido desinfectante, que inactiva y mata a los agentes infecciosos.

Este tipo de desinfección puede realizarse con una amplia variedad de desinfectantes. Su eficacia depende de tres factores:

*Tipo de desinfectante utilizado, Concentración y Tiempo de contacto.*

El sistema es de bajo costo y puede realizarse en la fuente de generación, este puede tratar residuos biológicos tanto comunes como infecciosos. Pero ya que algunas cepas de patógenos son resistentes al químico determinado y también el interior de las agujas o jeringas aumentando los riesgos de infecciones por contacto pierde su efectividad, considerando también que este método no permite reducir el volumen de los desechos tratados.

### **5.1.2 Desinfección Térmica Húmeda:**

Consiste en someter los residuos bio-infecciosos a un tratamiento térmico, bajo ciertas condiciones de presión, en una cámara sellada (autoclave) por un tiempo determinado, previa extracción del aire presente. Para que la desinfección sea completa, el vapor tiene que penetrar en cada parte de los desechos y mantener la temperatura alrededor de los 160°C por un mínimo de 12 a 15 minutos. Se encuentran disponibles autoclaves de diferentes tamaños que pueden ser seleccionados de acuerdo con la cantidad de desechos generados por el hospital o el grupo de hospitales.

Para una desinfección efectiva, sobretodo de las agujas, es preferible su trituración preliminar. Los factores principales que deben considerarse cuando se tratan desechos infecciosos mediante la esterilización de vapor son el tipo, volumen y carga de tratamiento del desecho.

. Este sistema tiene un alto grado de efectividad, destrucción total de patógenos si se opera a las temperaturas, presiones y tiempos adecuados, no se necesita acondicionar los residuos previamente al proceso y bajo costo de inversión, operación y mantenimiento. Su desventaja es que no permite reducir el volumen de los desechos, genera aerosoles, se elevan los costos cuando se trata de los recipientes y/o bolsas termo resistentes y la desventaja más

peligrosa es que posterior al proceso los residuos quedan reconocibles por lo tanto se corre el riesgo de reutilización.

### **5.1.3 Desinfección Por Microondas:**

Consiste en someter los desechos bio-infecciosos, previamente triturados y rociados con vapor, con vibraciones electromagnéticas de alta frecuencia, hasta alcanzar y mantener una temperatura de 95 °C a 100 °C por el tiempo necesario. Estas vibraciones electromagnéticas producen como resultado el movimiento a gran velocidad de las moléculas de agua presentes en los desechos. La fricción que se origina entre ellas genera un intenso calor, lo que causa la desinfección de los desechos. La aplicación de esta tecnología implica una trituración y desmenuzamiento previo de los residuos biológicos o infecciosos, a fin de mejorar la eficiencia del tratamiento. Con este proceso los residuos reducen su volumen en un 60%.

El proceso no es apropiado para grandes cantidades de residuos y tampoco para desechos anatómo-patológicos (Las temperaturas de tratamiento (95°C) no eliminan todo el espectro de patógenos presentes en los residuos) ya que existe el riesgo de emisiones de aerosoles que pueden contener productos orgánicos peligrosos. Tampoco se recomienda este sistema de tratamiento para residuos corto-punzantes, ya que las microondas, al rebotar en el metal generan descargas eléctricas entre éstos y las paredes del horno.

### **5.1.4 Desinfección Por Irradiación:**

Consiste en destruir los agentes patógenos presentes en los residuos mediante su exposición a radiaciones ionizantes. El proceso de ionización puede ser definido como la tecnología para producir cambios útiles y deseados

en ciertas propiedades de los productos tratados, tales como la estructura o el nivel bacteriológico de dichos productos.

Se debe realizar la molienda o trituración preliminar de los residuos para mejorar la eficacia del procedimiento. La irradiación es un proceso de alta tecnología que debe ser operado con grandes precauciones y necesita de estructuras físicas adecuadas. Los riesgos que se enfrentan en la utilización de sustancias radiactivas son bien conocidos: Daños al patrimonio genético, a la médula ósea, a las células de la sangre y a la piel, entre otros.

La ionización puede realizarse por varias fuentes de energía, siendo las más usuales: Ionización gamma producida por radio nucleidos e isótopos radiactivos (Cobalto y Cesio) e Ionización por haz de electrones. Producida por un acelerador de electrones que puede ser lineal (clásico) o circular (moderno). Sin embargo, no es lo suficientemente energético para producir cambios en los núcleos de los átomos, por lo que el producto nunca se convierte en radiactivo.

Es capaz de destruir completamente los patógenos, tratan residuos comunes y biológicos, pero requiere máxima seguridad ante el peligro de radiaciones y se tiene formación de ozono durante la operación del equipo (efecto corona), que en altas concentraciones puede ser tóxico para la salud de las personas y el medioambiente.

#### **5.1.5 Incineración:**

Consiste en destruir algunos desechos hospitalarios mediante un proceso de combustión en el que éstos son reducidos a cenizas. Los incineradores pueden quemar la mayoría de los desechos sólidos peligrosos, incluyendo los farmacéuticos y los químicos orgánicos, pero no los desechos radiactivos ni los contenedores presurizados. Los incineradores modernos están equipados con una cámara primaria y otra secundaria de combustión como se muestra en la

Figura 21 provistas de quemadores capaces de alcanzar la combustión completa de los desechos y una amplia destrucción de las sustancias químicas nocivas y tóxicas (dioxina, furanos, etc). En la cámara de combustión secundaria se alcanzan temperaturas de alrededor de 1.100 °C y se opera con un tiempo de permanencia de los humos de un mínimo de dos segundos. Para tratar el flujo de gases y las partículas arrastradas, antes de ser liberados a la atmósfera, se agregan torres de lavado químico, ciclones, filtros, etc. Los incineradores operan con máxima eficiencia cuando los desechos que se queman tienen un poder calórico suficientemente alto, es decir, cuando la combustión produce una cantidad de calor suficiente para evaporar la humedad de los desechos y mantener la temperatura de combustión sin añadir más combustible. En general, es preferible que los incineradores operen continuamente, ya que los cambios de temperatura provocados por la detención del funcionamiento deterioran rápidamente los revestimientos refractarios.

Un incinerador a funcionamiento continuo o discontinuo, cuidadosamente operado, tiene una vida útil de 10 a 15 años. Necesita mantenimiento constante y un mantenimiento anual extraordinario que implica la detención del equipo entre 20 y 30 días.

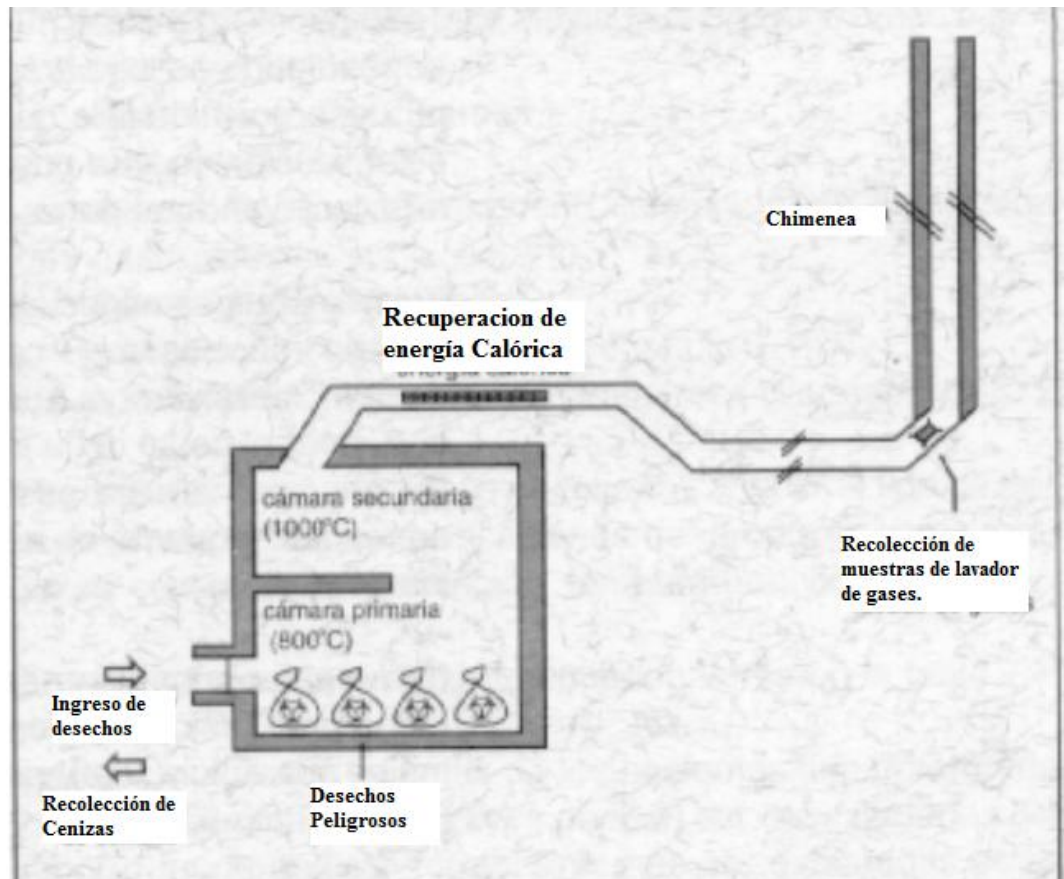


Figura 21 Proceso de Incineración

Los parámetros que se deben tener en cuenta y que tienen influencia en la eficacia del tratamiento son, en primer lugar el dispositivo debe contar con dos cámaras o más de incineración, la primera cámara debe alcanzar temperaturas entre 600°C y 850°C, temperatura a la cual combustiónarán los residuos con contenido de carbono e hidrógeno, la cámara secundaria y subsecuentes deben alcanzar temperaturas superiores a 1200°C, donde los gases provenientes de la cámara primaria con contenido de gases tóxicos de la quema de plásticos (Dioxinas, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> entre otros) romperán sus cadenas químicas logrando un efluente con un mínimo de emanaciones peligrosas.

Este sistema puede destruir cualquier material que contenga carbón orgánico, incluyendo los patógenos y produce una reducción importante en el volumen de los residuos (80%-95%). Bajo ciertas condiciones, permite el tratamiento de residuos químicos y farmacéuticos, pero es un sistema de costo muy elevado, cuesta dos o tres veces más que cualquier otro sistema, además genera un alto consumo de combustible, sobre todo cuando se trata residuos con alto contenido de humedad).

#### **5.1.6 Otras tecnologías:**

**Pirólisis:** Proceso de inactivación de los microorganismos infecciosos por la descomposición química de sus moléculas. Es una tecnología emergente donde se aplica calor sin oxidación de los residuos sólidos biológicos, para lograr una descomposición química de las moléculas orgánicas de los residuos a elementos simples (carbón, hidrógeno, etc.). En la cámara de acero inoxidable donde se realiza la pirólisis el calor es generado por resistencia eléctrica y las paredes de la cámara son enfriadas con agua.

**Detoxificación sintética:** Esta tecnología utiliza vapor sobrecalentado para convertir los residuos biológicos en vapor no tóxico y en residuos secos inocuos. Los residuos biológicos, que pueden ser vidrios, metales, papel o madera, son triturados en una primera etapa y reducidos a dimensiones de 0,6 [cm] aproximadamente. Los residuos triturados fluyen a un evaporador donde son trasladados por un transportador tipo gusano hacia la puerta de descarga; en su recorrido los residuos son expuestos a un flujo de vapor sobrecalentado que está a una temperatura entre 590°C a 650°C. Las partículas del residuo biológico triturado fluyen en dirección opuesta a la del vapor, siendo en este



proceso convertidas en vapor orgánico no tóxico (dióxido de carbono y agua) y en residuos secos inorgánicos inocuos.

**Piroxidación:** Esta tecnología combina el proceso de descomposición química de los residuos biológicos logrados con la pirólisis, con la oxidación en una segunda etapa mediante un flujo controlado de aire a la cámara.

**Plasma.** Proceso en el que se destruyen los patógenos por la alta temperatura que se genera al ionizar un gas en la cámara de tratamiento. Esta tecnología emergente que comúnmente se viene aplicando en la industria del acero (soldadura), se ha incorporado recientemente al tratamiento de los residuos biológicos. Un arco eléctrico se produce entre dos electrodos que ionizan un gas inerte, suministrado a través de una boquilla, formando así el plasma (el gas ionizado es definido como plasma). El arco calienta el gas a una temperatura a la que resulta ionizado. Con este proceso el plasma llega a temperaturas muy altas con las que se destruyen los patógenos de los residuos biológicos [13].

En la Tabla 1 se muestra el resumen con los impactos negativos sobre el medio ambiente de los distintos tratamientos antes mencionados.

<b>Tratamiento</b>	<b>Acción</b>	<b>Impactos</b>	<b>Efectos Directos Sobre la Salud</b>
<b>Desinfección Química</b>	-Uso de solución química, emisión de gases. -Efluentes químicos	- Contaminación Atmosférica (aire). - Contaminación del agua.	- Inhalación de químicos
<b>Desinfección Térmica</b>	- Uso de autoclave, emisión de aerosoles	- Contaminación atmosférica. - Malos olores.	- Riesgo de quemaduras
<b>Desinfección por microondas</b>	- Emisión de aerosoles Orgánicos.	.Contaminación atmosférica.	-----
Desinfección por Radiación	- Haz de electrones, radiación - Desechos radiactivos (fuente de generación) - Formación de ozono	- Radiación al medioambiente. - Contaminación del suelo. - Gas efecto invernadero	- Peligro de Radiaciones.
Incineración	- Quema de residuos, emisión de dioxinas - Mala disposición de Cenizas.	-Contaminación atmosférica. - Malos olores. - Contaminación de aguas. - Ruido.	- Quemaduras -Intoxicaciones

**Tabla 1 Impactos negativos de tratamientos para residuos hospitalarios.**

## **5.2 Estrategia general frente al problema de los residuos hospitalarios:**

Básicamente, esta estrategia se sustenta en el supuesto de lo descrito anteriormente en particular a la correcta identificación del tipo de desecho del cual trata, ya que al asimilarlo a un *desecho doméstico* presenta un alto nivel de riesgo para la población, por las características citadas anteriormente.

Es importante además que se desarrollen estrategias locales de vigilancia, correcta y constante fiscalización por parte de las entidades gubernamentales correspondientes, para así detectar los accidentes y efectos adversos relacionados con la manipulación y exposición a los desechos. Esto permitirá aumentar el conocimiento general sobre sus riesgos, adoptar medidas correctivas oportunas, y evaluar la efectividad de las mismas en el largo plazo.

Como hemos visto, la variedad de desechos generados en los hospitales es muy amplia. De todos ellos, en esta tesis se enfoca a los desechos con potencial riesgo microbiológico, y en especial a los citotóxicos ya que es un tema urgente por su amplio nivel de toxicidad dentro y fuera del establecimiento hospitalario y en su tratamiento de destrucción y eliminación. Se propone con la aplicación del dispositivo propuesto puede atender esta necesidad que afecta potencialmente la salud pública ya que los agentes mutagénicos por parte de los desechos citotóxicos son capaces de ser destruidos por los altos niveles de temperatura permitiendo así eliminar por completo sus propiedades cancerígenas, lo que justifica un estudio de implementación necesario para nuestro país. Los restantes tipos de desecho se abordan de un modo general, destacando sólo sus aspectos más relevantes en cuanto a riesgos y manejo.



Figura 22 Campaña contra la incineración de desechos patogénicos y el riesgo de la salud intra y extra hospitalaria en Argentina.

## 6 Proceso de Gasificación por plasma en eliminación de residuos:

La gasificación es un proceso termodinámico ampliamente conocido mediante el cual toda sustancia sólida o líquida a la que se le adhiere una cantidad de energía suficiente como para romper los enlaces moleculares, se transforma o bien en un gas de síntesis orgánico de bajo poder calorífico o bien en una lava fundida que al enfriarse se transforma en un producto vítreo inerte (Proceso de vitrificación). Si bien es un proceso en el que se dan algunas reacciones de oxidación, no es un proceso de combustión propiamente tal.

La gasificación es además una tecnología simple y probada comercialmente. En una primera aproximación, el proceso se utiliza para la conversión de materiales en un gas de síntesis limpio (*syngas*) a través de la reacción de oxígeno con vapor. Este *syngas* puro obtenido se deja enfriar y se purifica y luego es utilizado para una serie de propósitos: *syngas* para químicos, combustibles gaseosos, combustibles líquidos para calderas comerciales para

producir vapor, procesos de transferencia de calor y combustión interna en motores para producir energía eléctrica.

Se habla de gasificación convencional cuando se trabaja a temperaturas que no superan los 1700 °C. Esto es lo que se conoce como gasificación incompleta, y puede dar lugar a subproductos residuales como alquitranes, escorias o cenizas. Las altas temperaturas que se consiguen con las antorchas de plasma, sin embargo, permiten realizar el proceso de gasificación a alta temperatura, que es capaz de lograr una disociación molecular completa, evitando consecuentemente la presencia de subproductos tóxicos y la formación de dioxinas y furanos. Precisamente por esto resulta un proceso útil a la hora de eliminar residuos, ofreciendo ventajas sobre otros procesos clásicos como la incineración.

### **6.1 Características Diferenciales Del Proceso De Gasificación Por Plasma:**

En el proceso de gasificación, además del consumo energético hay que considerar los factores “temperatura” y “presión” tanto en cuanto la velocidad de las reacciones (cinética) como al grado de cumplimiento de las mismas (termodinámica). La formación de monóxido de carbono y de hidrógeno aumenta a medida que se incrementa la temperatura. En general al desarrollarse el proceso de gasificación entre 4.000 °C (en la zona plasmática) y 1.700 °C (temperatura de salida del gas de síntesis), se puede conseguir una cinética alta de reacción, reducir el tamaño del gasificador y trabajar a presión atmosférica, lo que permite reducir los costos de construcción del mismo.

El resultado final es que solo las moléculas básicas de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> son capaces de resistir las altas temperaturas que producen las antorchas de plasma, eliminando cualquier otro compuesto de los residuos iniciales.

Por otro lado, existe una destrucción de compuestos tóxicos, incluso los semi-volátiles, evitando la formación de dioxinas, furanos u otros. La zona de disociación molecular comienza a partir de 2.700°C. A temperaturas inferiores pueden existir moléculas no completamente disociadas, una parte de las cuales se encontrarán en las cenizas, mientras que la otra parte se volatizará en forma de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y/o semi-volátiles (SVOC). Con el uso del plasma, todas las moléculas se disocian totalmente.

Gracias a las altas temperaturas, también se habla de un proceso de fusión de moléculas inorgánicas y transformación en lava de tipo volcánico que al enfriarse forma un vidrio basáltico inerte (dejando atrapadas en la red cristalina los compuestos potencialmente peligrosos, como por ejemplo los metales pesados). Los ensayos oficiales realizados sobre este material han demostrado su total inocuidad y no toxicidad. Los más recientes estudios han concluido que además de no ser peligrosos se pueden considerar como materia reutilizable.

## **6.2 Capacidad de tratamiento:**

Prácticamente cualquier material se puede reducir por medio de la gasificación por plasma, incluyendo residuos radiactivos de nivel bajo en ciertas condiciones. Los materiales que pueden ser tratados de forma efectiva y segura, estos pueden ser carbón, lodos, cenizas de incineración, cenizas peligrosas, residuos médicos y patológicos, productos de la pirolisis, residuos ferrosos, residuos con cromo, compuesto con manganeso, titanio, productos recuperados de niobio, polvos de hornos de arco eléctrico, cementos, papel, cartón, plásticos, fibras de vidrio, asbestos, madera, vidrio, cerámica, goma, ruedas, asfaltos utilizados y contaminados, aceites, arenas, materiales con resinas, linóleo, plásticos de tuberías, disolventes, pinturas y otros materiales con contenidos de carbono.

### 6.2.1 Subproductos del proceso:

Existen tres sub-productos principales que son resultado del proceso de gasificación por plasma: gas de síntesis (*syngas*), cristal vitrificado (*slag*) y *calor*.

El *Syngas* es una mezcla de varios gases, comprendiendo principalmente CO y H<sub>2</sub> el que puede ser utilizado como fuente de combustible, y algunas plantas lo utilizan para auto proveerse de potencia y para vender el exceso de electricidad a la red eléctrica.

El *Slag* es un subproducto sólido del proceso de gasificación, es un cristal vitrificado de características y posibilidades interesantes. En primer lugar, se debe hacer notar que el peso y volumen del material residuo original se reduce significativamente.

El peso del slag es el 20% del peso del residuo original, el volumen del slag es el 6% del volumen del residuo original.

Además el Slag puede tomar diferentes formas en función del proceso de enfriamiento. Por ejemplo, el slag enfriado con agua forma una clase de arena de la que se pueden separar fácilmente nódulos de metal.



Figura 23 Arena formada desde Slag enfriado con agua.



**Figura 24 Nódulos metálicos separados de la arena.**

Si el slag se enfría al aire, forma rocas negras y vidriosas, que se pueden utilizar para crear cemento o asfalto. El Slag derretido se puede comprimir en forma de ladrillo o moldes de piedra, y después utilizarse como material de construcción.



**Figura 25 Slag enfriado al aire.**



### 6.3 Residuos Y Emisiones:

A parte del Slag vitrificado ya mencionado, la tecnología de arco de plasma prácticamente no produce ningún otro residuo. Sin embargo, puede haber ciertas emisiones resultantes del proceso, producidas principalmente durante la limpieza del Syngas previa a la combustión en turbina, o durante la combustión como tal. También se pueden producir emisiones al convertir el Syngas en productos industriales o en la limpieza de filtros y maquinarias.

Una fuente con la suficiente autoridad para discutir los outputs del proceso es la Universidad de California, cuyo reporte del año 2009 incluye resúmenes de prueba realizadas en diferentes plantas de gasificación por plasma del mundo, que tratan residuos médicos y electrónicos, entre otros.

En todos los casos, se ha demostrado que las emisiones son menores a los estándares aplicados en cada región. A continuación se muestra el ejemplo de plantas de operación sobre residuos médicos:

Emisión [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Medido	Estándar US- EPA
MP	<3.3	20
NO <sub>x</sub>	162	308
SO <sub>x</sub>	-	85.7

**Tabla 2 EPA: Test de verificación tecnológica medioambiental de “In EnTec Plasma Arc Gasification” de residuos médicos, Richland, Washington, USA.**

Cabe destacar que los datos anteriores no representan emisiones al aire, sino emisiones potenciales previas al control de contaminantes del flujo de

trabajo. Este control se puede conseguir con diferentes tecnologías de control de emisión de contaminantes.

### **III) Diseño Antorcha De Plasma Para Eliminación De Residuos Hospitalarios:**

Los métodos térmicos, parecidos a la incineración o pirolisis son aplicados generalmente para la eliminación y reciclaje de desechos hospitalarios, desechos peligrosos y desechos municipales, sin embargo generan gran contaminación tales como dioxinas, furanos y metales pesados (Cd, Pb y Cr) y se mantienen los materiales infecciosos depositados en las cenizas. En este trabajo de Tesis se propone un diseño en base a la tecnología de plasmas térmicos para el tratamiento de desechos hospitalarios, la cual trata de una antorcha de plasma de arco no transferido a nivel experimental.

#### **6.4 Especificaciones Eléctricas:**

Se propone alimentar esta antorcha con 40[kW] de potencia para obtener un funcionamiento óptimo del dispositivo en base al objetivo, este valor fue considerado posterior a diversa literatura [8,9,10,11], tanto investigada como sugerida por el Dr. Biswajit Bora Investigador especializado en el tema de antorchas de plasma del Departamento de Plasmas Termonucleares de la CChen

Se propone una fuente de poder DC para suministrar potencia a la antorcha de plasma con un control y regulador de la corriente de salida.

La fuente de poder debe estar protegida contra un chispazo de alta frecuencia y alto voltaje. A continuación se detallan las características de entrada y salida de la fuente para la antorcha propuesta.

**Entrada:** 400V  $\pm$  10 %, 3 phase 50 Hz.

**Salida:**

Voltaje en circuito abierto	150 [V] DC.
Voltaje de Carga	20 a 100 [V] DC, ajustable continuamente
Corriente de Carga	30 a 400 [A] DC, ajustable continuamente
Regulación de corriente	$\pm$ 1 % de corriente nominal
Corriente en corto circuito	400[A], en el ajuste máximo.

**Tabla 3 Características de Salida de la fuente de Poder de alimentación para la Antorcha de Plasma propuesta [12].**

6.5 Planos De Propuesta De Diseño:

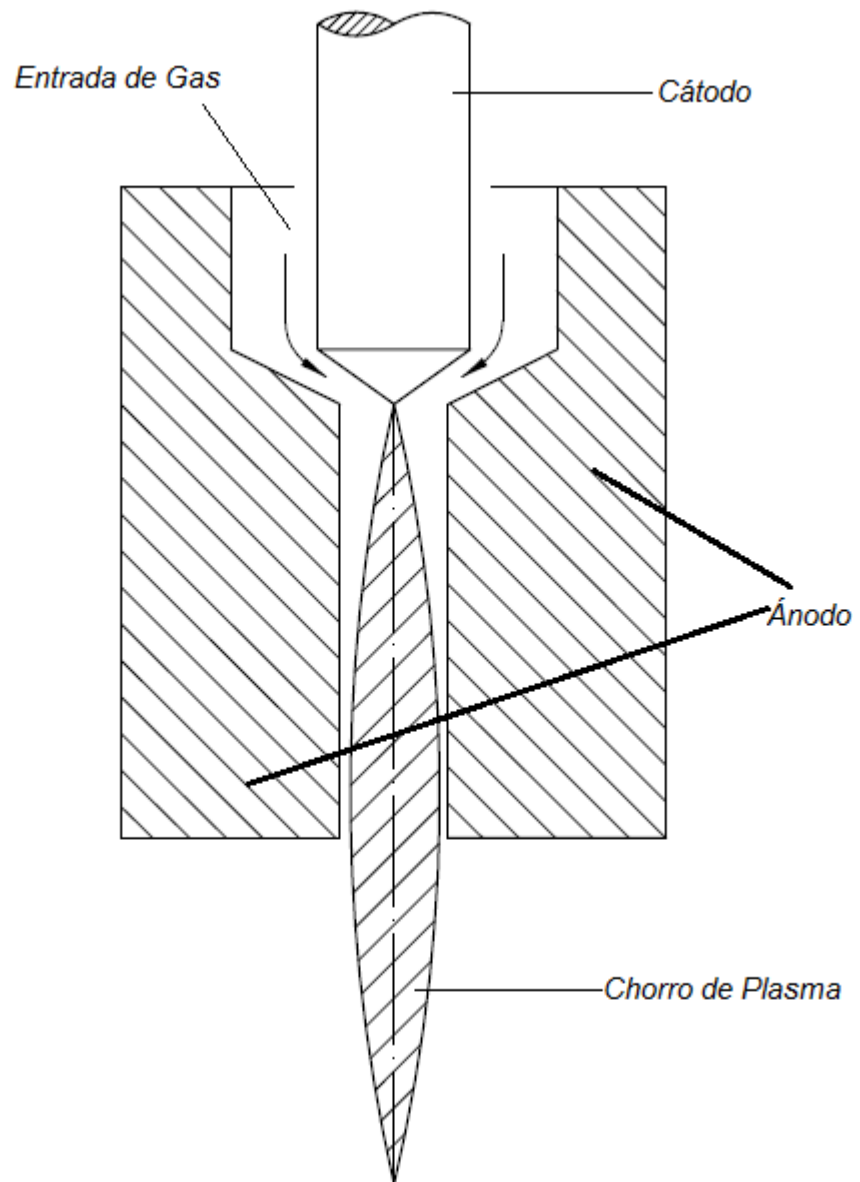


Figura 26 Antorcha de plasma no transferido.

En la Figura 26 da muestra de un corte axial de una antorcha de plasma de modo no transferido, detallando la ubicación del ánodo y el cátodo además de la forma de inyección del gas de operación, para este diseño se considerará un flujo de 15 Litros por minuto. Se observa también la tobera que forma el ánodo con el fin de estabilizar la salida del chorro de plasma.

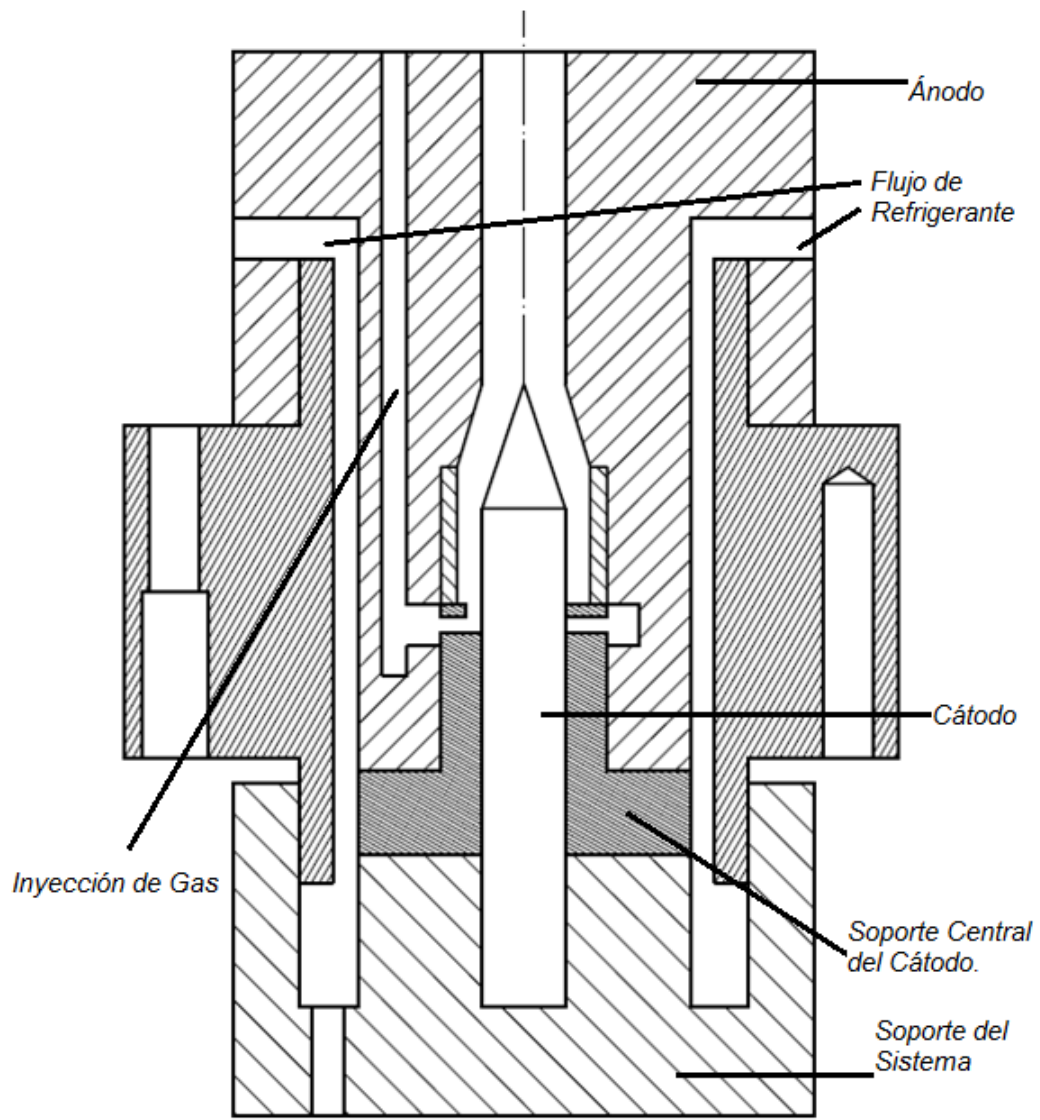


Figura 27 Corte Axial de la Antorcha de Plasma.

La Figura 27 también detalla un corte axial de la antorcha de plasma esta vez incluyendo los soportes tanto del ánodo como de cátodo, componentes primordiales para el buen funcionamiento, destacando que el material de este debe ser de teflón, por su resistencia a altas temperaturas y corrosiones. Se observa además el canal de enfriamiento, parte importante del dispositivo ya que permite mantener la temperatura necesaria para no destruir, ni alterar el funcionamiento de este.

**a) Electrodo:**



**Figura 28 Electrodo de la Antorcha de Plasma propuesta a nivel experimental.**

En la Figura 28 se muestra el Ánodo (A) construido a base de Tungsteno, este material tiene una larga vida útil al ser sometido a altas temperaturas y bajo las condiciones de funcionamiento de la antorcha de plasma es un electrodo menos sensible a la corrosión con respecto al cátodo.

Atendiendo a la geometría del ánodo se propone una boquilla *convergente-divergente* con un ángulo medio de  $45^\circ$ , tanto para la sección convergente y la divergente. El diámetro externo de esta se propone de 21[mm], la boquilla cumple la función de estabilizar la salida del chorro de plasma [14].

A continuación se detallan las dimensiones propuestas, basadas en el modelo “*The Virginia Tech Plasma Torch, 3rd Generation, (VTPT-3)*”

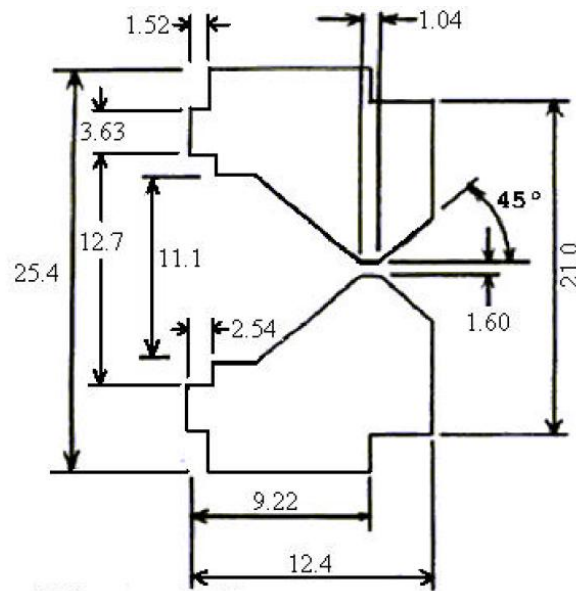


Figura 29 Esquema Del Ánodo De La Antorcha De Plasma Experimental. Ref: *Plasma Torch, 3rd Generation, (VTPT-3)* [14]

En la Figura 28 (I) se muestra el cátodo. Este es de mayor preocupación por la alta densidad de flujo térmico y densidad de corriente a los que se ve sometido, se propone para este electrodo un 2% de Torio al Tungsteno para así reducir la función trabajo  $\phi$ , de 4,5 [v] a 2,6[V], ya para el buen funcionamiento de un electrodo siempre es necesario disminuir la función trabajo. Además se destaca otra característica positiva de este material, su mayor facilidad de manipulación mecánica.



Con respecto a su geometría, como se muestra en la Figura 30, este forma una punta en su corte final, la que forma un ángulo de  $20^\circ$  con respecto al eje axial, este ángulo es considerado por la configuración del ánodo y la distancia a este para el funcionamiento óptimo del dispositivo. El diámetro de este es de  $3,175[\text{mm}]$  y largo de  $8,2 [\text{cm}]$ . [14]

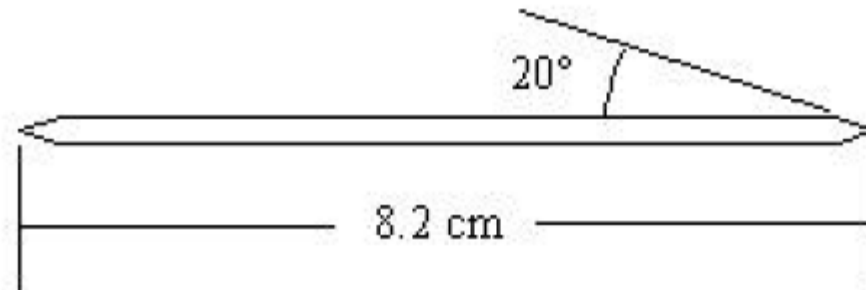


Figura 30 Esquema del cátodo de la Antorcha de Plasma a Nivel Experimental.

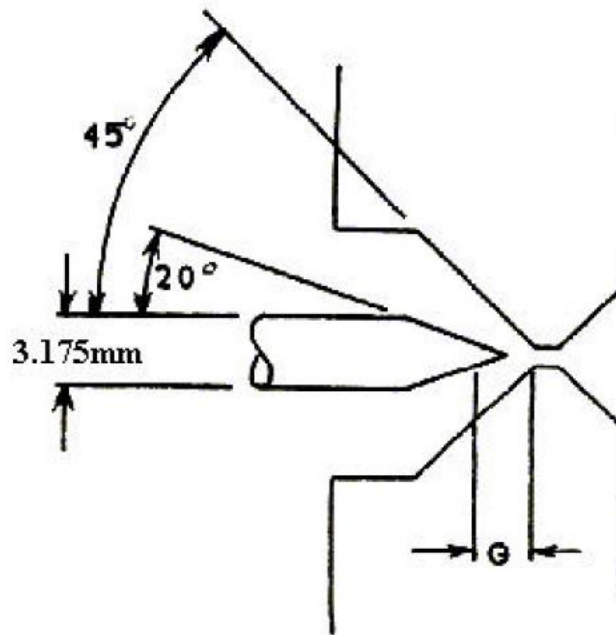


Figura 31 Esquema Ánodo, Cátodo y Gap "G", para la Antorcha de Plasma a nivel experimental.

En la Figura 31 se muestra el esquema que relaciona la distancia entre los electrodos, es decir el "Gap", una de las variables más importantes para la formación de plasma térmico, ya que es donde el voltaje de ruptura es capaz de encender el Arco eléctrico. Para nuestro caso este quedará definido como  $G = 0,178[\text{mm}]$ , ya que según las curvas de Paschen para el argón, gas que se propone y se dispone, trabajando a presión atmosférica,  $760[\text{Torr}]$ , se obtiene un Voltaje de ruptura capaz de obtener el arco eléctrico.

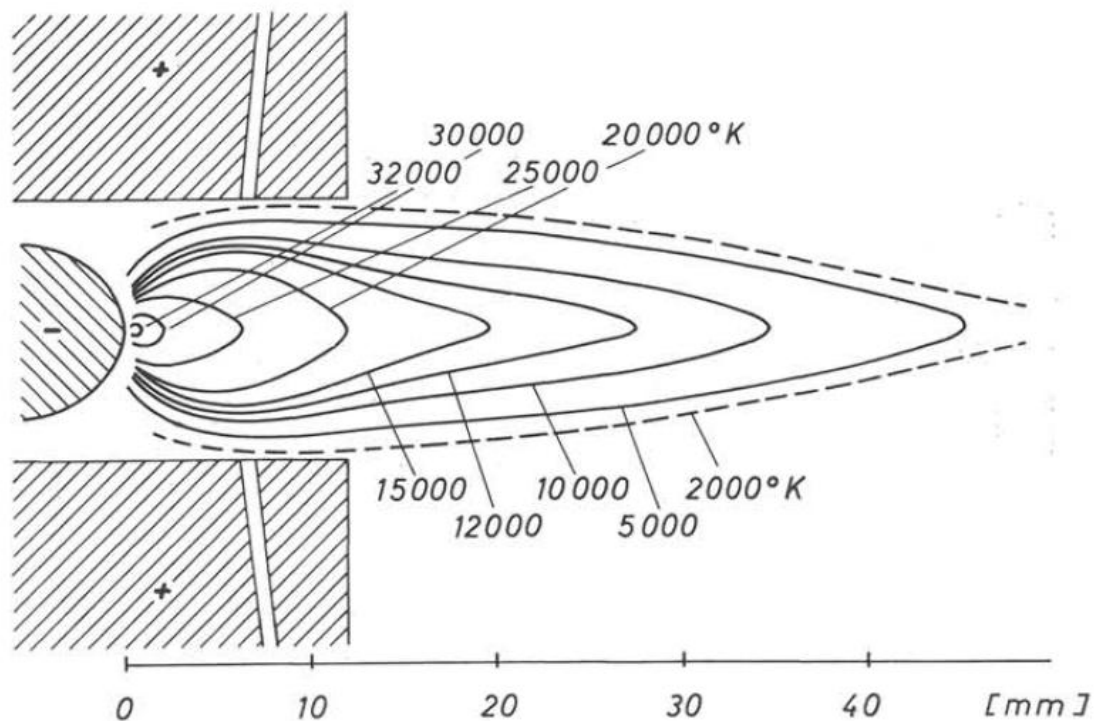


Figura 32 Isotermas de un Chorro de Plasma a 400[A]. Ref [5]

Se propone como gas de trabajo para la antorcha del Plasma el Argón ya que se sugiere que esta trabaje a presión atmosférica y bajo esos parámetros según la curva de Paschen (Figura 12) para este gas en particular es mucho más efectivo obtener el voltaje de ruptura. En la figura se muestran las isotermas de un Chorro de Plasma bajo las condiciones eléctricas y geométricas propuestas, se sugiere posicionar la muestra a 50[mm], para obtener los resultados requeridos que es la destrucción de los patógenos biológicos y obtener material reciclable y evitando emisiones contaminantes [12,13].

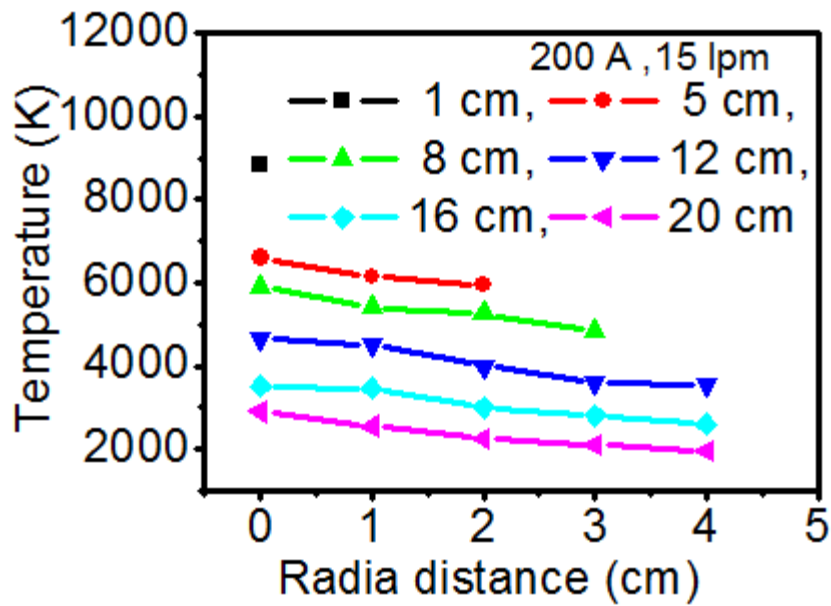


Figura 33 Distancia radial v/s Temperatura a lo largo del chorro de plasma.Ref: [12]

En la Figura 33 se muestra un gráfico obtenido en la simulación de una antorcha de plasma a base de Argón con un flujo de 15 litros por minuto, operado a presión atmosférica. Bajo los mismos parámetros tanto geométricos como eléctricos y configuración de electrodos de la antorcha de plasma propuesta.

## 7 Conclusión:

El estudio realizado se llevo a cabo en profundidad con respecto a su factibilidad, ya que en un principio se pretendía construir el dispositivo en conjunto con los especialistas del departamento de Plasmas Termonucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear. Por la duración de mi estadía como tesista, no hubo oportunidad de concluir ese objetivo, ya que no se disponía de la fuente de poder propuesta por su dificultosa construcción y alto costo, llegando este a los \$12.000.000.-

Se decidió continuar con el estudio a nivel teórico siempre en apoyo de profesionales expertos en la materia, logrando comprender a fondo el estado del arte de las antorchas de plasma, además de ahondar en los sistemas de tratamiento de desechos hospitalarios y normativas vigentes en Chile. Por lo que posteriormente se decidió realizar un estudio de factibilidad económica para la implementación de un sistema de destrucción de desechos hospitalarios en nuestro país, lo cual fue bastante dificultoso por la falta de información y las constantes negativas de las empresas privadas encargadas de tratar desechos hospitalarios con respecto a sus métodos de tratamientos, toneladas de desechos diarios y tipos de desechos tratados, fuente importante a la hora de evaluar el proyecto.

En base a lo realizado y los resultados obtenidos para cada una de las dimensiones y materiales propuestos en el diseño de la antorcha de plasma para eliminación de residuos hospitalarios se basaron en los argumentos matemáticos y físicos referente al estado de plasma, atendiendo principalmente a la "*Ley de Paschen*" y "*Curvas de Paschen*", que se relaciona directamente con los electrodos y gas de trabajo.

Con respecto a los materiales, se realizó un estudio a fondo de buenas tecnologías capaces de alargar la vida útil de los electrodos, por su constante exposición a altas temperaturas. Para el caso del Tungsteno tiene un costo de \$50.000.- aproximadamente el kilo, si se considerase llevar a cabo el diseño, es viable, por las pequeñas dimensiones de los electrodos. El cilindro de Argón de  $6,5[m^3]$  tiene un costo de \$145.250.-, por lo tanto si la antorcha trabaja con un flujo de 15[Lpm] y se usa a nivel experimental también es viable por su bajo consumo. En el caso del aislante, el teflón tiene un alto costo con respecto a sus pares, esto por sus alta resistencia en lo que respecta a temperatura y soluciones altamente corrosivas, una barra de 50 [mm] de diámetro por 500 [cm] de largo, alcanza los \$35.000.

Dentro de los desechos hospitalarios necesitan especial cuidado en su tratamiento y eliminación, ya que algunos son muy peligrosos ya que contienen grandes cantidades de compuestos plásticos, virus, microorganismos infecciosos, restos de medicamentos citotóxicos y todo material que haya estado en contacto con ellos que presentan riesgos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos.

Me gustaría dar énfasis en este tipo de droga, por su alto nivel de toxicidad, para eliminar el principio activo de esta droga es necesario exponerla a altas temperaturas, que con los sistemas actuales en Chile no es posible generar. En el departamento de Física se realizan estudios con una droga citotóxica *Mitomicina C*, la que está siendo tratada con ácido para destruir sus moléculas, situación que aún no ha sido posible, el contacto de esta droga y cualquier tipo de ácido es también nocivo para la salud por lo que sigue siendo una buena opción generar altas temperaturas para tratar este tipo de drogas.

Con respecto a la disposición de los residuos tanto peligrosos como radiactivos, se visitó el Hospital Barros Luco, del Trabajador y Sotero del Río,

la empresa que presta el servicio de tratar los residuos hospitalarios del tipo no domiciliario se trata de Stericycle, quienes retiran directamente del almacenamiento interno del hospital, los de tipo domiciliario son retirados directamente por el camión dispuesto por la Municipalidad de cada comuna. En particular con la empresa Stericycle, se realizó una visita a su planta de tratamiento en la comuna de Quilicura, donde fue imposible tener acceso a la información del funcionamiento, tipo y control de emisiones de sus hornos de tratamiento. De las consultas del tratamiento de los citotóxicos, la empresa asegura que posterior al tratamiento térmico, los restos de dichos residuos, tanto de medicamentos vencidos, como de ampollas, gasas contaminadas con agentes cancerígenos tratados con este tipo de medicamento son dispuestos a la empresa Hidronor, donde aseguran que ellos les dan un tratamiento químico capaz de anular el principio activo y posteriormente los desechos de estos son dispuestos al alcantarillado, tras lo citado por Stericycle, se intentó consultar a Hidronor, quienes también respondieron con una negativa a cada una de las preguntas realizadas.

Se propone en un próximo tema de tesis, el llevar a cabo este diseño con el fin de la eliminación de las drogas citotóxicas y agentes patógenos que pongan en riesgo la salud de la población, ya que se trata de un dispositivo amigable con el medio ambiente, eficiente y donde sus residuos pueden ser reutilizados. Son capaces de eliminar agentes mutagénicos, cancerígenos y todo tipo de patógenos que ponen en riesgo la salud de las personas y animales. Además promueve la fiscalización correcta de parte de las entidades gubernamentales tanto de salud como medio ambiental, ya que con su participación permitirá sacar a la luz un problema que es de absoluta ignorancia para la sociedad chilena, que es el de tratamiento y manipulación de desechos hospitalarios en nuestro país tanto dentro como fuera de los recintos de salud. Todo esto porque las empresas existentes tendrán que poner a disposición un plan de

mejora en sus plantas para entrar en competencia con la tecnología propuesta y poder ser sustentables en el tiempo.



## 8 Bibliografía:

- [1] Chen F. "*Introduction to plasma physics*". Plenum Press, 1974.
- [2] Thompson W. B. *An introduction to plasma physics*. Adisson – Wesley
- [3] M.Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, "*Thermal Plasmas, Fundamentals and Applications*", Vol1, (Plenum Press, New York, 1994).
- [4] Knight H. de B. "*The Arc Discharge "its application to power control"*". Chapmanand Hall Ltd. 1960
- [5] Helmut Meyer. "*Fundamentos y aplicaciones del soplete de plasma*"
- [6] Penning F. M. "*Electrical Discharges in Gases*". Philips Technical Library. 1957.
- [6] Bolívar L. E. "*Caracterización del plasma en atmósfera de oxígeno de alta presión utilizado para la producción de películas delgadas superconductoras.*" Tesis (M. Sc en ciencias Físicas) Universidad del Valle, Facultad de ciencias. 1993.
- [7] Alonso Lopez Medina, "*Determinación De La Temperatura Del Gas De Una Descarga De Arco A.C. A Presion Atmosferica En Aire Utilizando Un interferometro Mach*" – Zehnderjavier, Universidad Del Vallefacultad De Ciencias; Programa Académico De Física; Santiago De Cali. 2005
- [8] Barbi, E., Mahan, J.R., O'Brien, W.F., and Wagner, T.C., "*Operating Characteristics of a Hydrogen-Argon Plasma Torch for Supersonic Combustion Applications*", Journal of Propulsion, Vol. 5. No.2, 1989

- [9] Pfender E., *“Electric Arcs and Arc Gas Heaters”*, Chapter 5, Gaseous Electronics, Vol.1, Hirsh M. and Oskam, editors, Academic Press, 1978.
- [10] CONAMA (2005a), (reporte de residuos sólidos en Chile.pdf pag 6)
- [11] Desechos Hospitalarios: *“Riesgos Biológicos y Recomendaciones Generales”* Agosto 2001; Ministerio De Salud; División De Inversiones Y Desarrollo De La Red Asistencial; Unidad De Evaluación De Tecnologías De Salud.
- [8] Manual REAS, *“Manejo de Residuos de Establecimientos De Atención de Salud”*; Segunda Edición 2010. Gobierno De Chile.
- [9] Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente. (Cepis). 1994. *“Guía para el manejo interno de residuos sólidos en centros de atención de salud”*. Perú.
- [10] CONAMA. 1998. *Una política ambiental para el desarrollo sustentable*. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile.
- [11] Instituto Nacional De Normalización. 2004. Norma Chilena N°2.120. Sustancias Peligrosas.
- [12] Radio Nederland Training Centre. 1998. Programa regional de desechos sólidos hospitalarios. *“Gestión y manejo de desechos sólidos hospitalarios”*. San José, Unión Europea.
- [13] B. Bora, N. Aomoa, M. Kakati. *“Characteristics and Temperature Measurement of a Non-Transferred Cascaded DC Plasma Torch Characteristics and Temperature Measurement of a Non-Transferred Cascaded DC Plasma Torch”*.

- [13] "*Medical Waste Treatment Using Plasma.*". Hyun-Seo Park, Beom-Jae-Lee and Seong-Jung Kim University, Jeonju, Korea.
- [14] *A Study of Plasma Ignition Enhancement for Aeroramp Injectors in Supersonic Combustion Applications, Gallimore, Virginia Tech.*