



# JIDeTEV

Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción



JIDeTEV- Año 2022 -ISSN 2591-4219

## Diseño de Desmalezadora Eléctrica para Control de Malezas en Yerbales Mediante Pulsos de Tensión

Forster W. M.<sup>a\*</sup>, Rivero M. N.<sup>a</sup>, Puertaz M.<sup>a,b</sup>, Oliveira M. O.<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> LIDEE, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: walterfor92@gmail.com, nico.m.rivero07@gmail.com, puertazmartin@gmail.com,  
mario.oliveira@fio.unam.edu.ar

---

### Resumen

Este artículo presenta los avances relacionados a un proyecto de grado que está siendo realizado en la cátedra Proyecto Electromecánico 2 el cual busca diseñar una desmalezadora eléctrica para control de malezas en yerbales mediante el uso de pulsos de tensión. En este contexto, el documento presenta el estudio del estado del arte y las primeras simulaciones computacionales relacionadas con el modelo eléctrico a utilizar en el desarrollo de la desmalezadora. El modelo eléctrico a utilizar, considera dos efectos importantes sobre un tejido vegetal expuesto en un campo eléctrico, la conductividad y la polarización, donde estos dependen exclusivamente de la frecuencia del campo. Los primeros resultados de simulación muestran el comportamiento de la impedancia eléctrica de un tejido vegetal, al aplicar tensión con forma de onda cuadrada de 5kV pico, con frecuencia de 10kHz.

**Palabras Clave** – Desmalezadora, Electricidad, Pulsos, Malezas, Yerbales.

### 1 Introducción

En la provincia de Misiones es común el uso de herbicidas para el control de malezas en casi todos los tipos de plantaciones (yerbales, teales, tabacales, entre otros). El herbicida más utilizado es glifosato (N-fosfometilglicina,  $C_3H_8NO_5P$ ) que es el componente activo, debido a su alto poder de eficiencia para controlar el crecimiento y proliferación de malezas, sin embargo, este herbicida es peligroso para la salud humana. Por otro lado, el área cubierta con plantaciones de yerba mate en la provincia de Misiones es de 181.890 hectáreas, lo cual representa un 6,1% de la superficie total [1]. Este porcentaje de tierra, está siendo tratado y mantenido en la actualidad con herbicidas sin un control adecuado de la cantidad utilizada.

En este contexto, este proyecto surge debido a la necesidad de mitigar el uso de herbicidas a base de químicos utilizados actualmente en los yerbales de la provincia de Misiones, los cuales son contaminantes para el medio ambiente y nocivos para la salud [2]. En el mismo se propone la utilización de energía eléctrica como elemento de control de malezas en yerbales, donde en la actualidad no existe implementación de este tipo de tecnología en la provincia. Este proceso es el único sistema no químico que elimina la planta (malezas) de forma sistemática, desde la hoja hasta la raíz. La corriente eléctrica recorre toda la planta desde su parte superior hasta las raíces, dañando así las células que entran en contacto directo con el sistema de aplicación. Esto reduce la capacidad de recuperación de esas plantas desde la raíz [3].

\*Autor en correspondencia.

La ventaja de la utilización de este método es que es de acción rápida cuyos efectos son de larga duración, similares a los de los herbicidas químicos y muy superiores a los de otros métodos térmicos o mecánicos. Además, tiene versatilidad dado que permite controlar plantas grandes o pequeñas presentando bajos requisitos de actividad fisiológica de la planta y poca dependencia del clima o la hora del día o la noche. Presenta poco movimiento del suelo con mínima erosión, máxima preservación del suelo, sin residuos químicos y sin riesgo para la vida subterránea [4].

A partir de esto, los objetivos específicos del equipo que se pretende diseñar son:

- Lograr una eliminación de malezas en un período de 10 días posteriores a la aplicación de corriente eléctrica.
- El equipo deberá operar satisfactoriamente sobre plantas de hasta 30 cm de altura como máximo.
- Alcanzar una autonomía del equipo para seis horas de trabajo.
- El equipo debe poder montarse y desmontarse de la máquina motriz con el mínimo requerimiento de herramientas especiales y en un tiempo no mayor a 30 minutos.
- El equipo deberá ser capaz de regular su ancho entre 2 y 3 metros.

## **2 Estudio del Estado del Arte**

### *2.1 Análisis Legal*

Las normativas relacionadas con el desarrollo del proyecto se presentan a seguir en forma resumida.

#### **Normativa Provincial**

1) *LEY XVI - Recursos naturales y medio ambiente N° 124 - Prohibición del uso del glifosato, sus componentes y afines en la Provincia de Misiones.*

La misma establece en su Artículo 1°, la prohibición del uso de glifosato, sus componentes y afines en el territorio de la provincia de Misiones. Esto viene a dar apoyo legal para el desarrollo de nuevas tecnologías más amigables con el medio ambiente.

2) *LEY XVI - Recursos naturales y medio ambiente N° 35 - Evaluación de Impacto Ambiental, Alcance, Infracciones y Sanciones.*

Debido a que el proyecto es nuevo en el territorio provincial y teniendo en cuenta que el mismo podría tener algún impacto sobre el medio ambiente, se deberá realizar el estudio correspondiente como nos indica esta ley en su Artículo 1°.

3) *LEY XVI - Recursos naturales y medio ambiente N° 37 - Ley de Conservación de Suelos.*

Se hace mención de esta normativa ya que la desmalezadora funciona con descargas eléctricas a través de las plantas, cerrando circuito por tierra, por lo tanto, se deberá verificar que el equipo no genere una degradación sobre el suelo.

4) *LEY X - Obras, transporte y servicios públicos N° 9 - Transporte Público de Cargas.*

La presente normativa afecta de forma directa al proyecto, ya que el mismo deberá ser trasladado mediante un vehículo de carga, el cual deberá respetar lo que indica dicha ley, sobre todo en sus artículos 1° y 8°.

### **Normativa nacional**

5) *Ley N° 22.428 DECRETO 681: Fomento de Conservación de Suelos.*

Régimen legal para el fomento de la acción privada y pública tendiente a la conservación y recuperación de la capacidad productiva de los suelos.

6) *Ley N° 19.587 ANEXO I Decreto 351/79 - Anexo I CAPITULO 15: Reglamento de Higiene y Seguridad en Máquinas y Herramientas.*

Se cita la presente ley nacional ya que el diseño del equipo deberá tener presente los requisitos solicitados por la misma en su artículo 106, relacionado con la seguridad de los operarios.

7) *Ley N° 19.587 ANEXO VI DECRETO 351/79: Reglamento de Higiene y Seguridad para las instalaciones eléctricas.*

Sabiendo que el equipo trabaja con una elevada tensión y altas frecuencias se debe considerar la presente ley para velar por la seguridad de los operarios como, por ejemplo, lo relacionado con distancias de seguridad.

*Distancias de seguridad para prevenir descargas eléctricas.*

Para prevenir descargas descriptivas en trabajos efectuados en la proximidad de partes no aisladas de instalaciones eléctricas en servicio, las separaciones mínimas, medidas entre cualquier

punto de tensión y la parte más próxima del cuerpo del operario o de las herramientas no aisladas por él utilizadas en la situación más desfavorable que pudiera producirse, serán las siguientes:

**Tabla 1:** Distancia mínima de seguridad (m)

<b>Nivel de tensión</b>	<b>Distancia mínima</b>
0 a 50V	Ninguna
Mas de 50V hasta 1kV	0,80
Mas de 1kV hasta 33kV	0,80
Mas de 33kV hasta 66kV	0,90
Mas de 66kV hasta 132kV	1,50
Mas de 132kV hasta 150kV	1,65
Mas de 150kV hasta 220kV	2,10
Mas de 220kV hasta 330kV	2,90
Mas de 330kV hasta 500kV	3,60

8) *Ley N° 19.587 DECRETO 617/97: Reglamento de Higiene y Seguridad para la Actividad Agraria.*

Esta normativa es de vital importancia a tener en cuenta para el proyecto, debido a que el equipo a desarrollar está asociado a la actividad agraria debiendo cumplir con todos los requisitos mencionados en la misma.

### **Normativa internacional**

9) *Organización Internacional del Trabajo (OIT)*

- Convenio sobre la protección de la maquinaria, 1963 (núm. 119)
- Recomendación sobre la protección de la maquinaria, 1963 (núm. 118)

10) *UR-E11 e IEC 60092-503: Requisitos unificados para sistemas con tensiones superiores a 1 kV hasta 15 kV*

Esta normativa internacional es citada para el proyecto ya que se prevé que el mismo trabaje con tensiones por encima de 1 kV, debiéndose respetar lo solicitado por la misma.

11) *IEC 60076-11:2018 Transformadores de tipo seco.*

Esta normativa se tiene en cuenta debido a que se deberá elevar la tensión haciendo uso de transformadores mediante convertidores de electrónica de potencia. En este sentido, de acuerdo a lo

especificado por [5], los transformadores de alta frecuencia son considerados como transformadores de potencia del tipo seco.

Concluido el estudio y análisis de las normativas mencionadas anteriormente, se determina que no hay impedimento alguno para llevar a cabo el proyecto, siempre que se respeten los requisitos de dichas normativas.

## 2.2 Máquinas Existentes y Métodos de Desmalezados Actuales

- a. Herbicida: Los herbicidas son productos químicos capaces de alterar la fisiología de la planta causando la muerte o desarrollo anormal de la misma. Los efectos fisiológicos afectados pueden radicar en la regulación del crecimiento, inhibición de la división celular, inhibición de la respiración y/o fotosíntesis, o interrupción de procesos metabólicos complejos. Actualmente existen varias marcas de herbicidas, pero en todas ellas se destaca al glifosato como componente principal.
- b. Sistema mecánico: Se basa en la utilización de fuego (Fig. 1) y medios mecánicos, como herramientas manuales (azadón y pala), tracción animal y maquinaria agrícola (arado y surcadora). Se pueden también utilizar coberturas de plástico negro o de material natural “mulch” (residuos de malezas y cultivos) [6].



Fig. 1. Sistema mecánico a fuego. [6]

- c. Vapor de agua: El método se aplica por medio de aspersión de agua caliente o vapor a plantas pequeñas. Existe equipo especializado que sirve para arrojar el vapor o agua caliente a zonas específicas de la parcela. La Fig. 2 muestra la aplicación de este sistema a un viñedo en un rango muy acotado de la parcela.



Fig. 2. Aplicación de vapor de agua. [6]

- d. Energía eléctrica: Este método consiste en la aplicación de tensión a las malezas del terreno mediante unos electrodos, haciendo circular corriente eléctrica por el tallo y las raíces de las plantas. La Fig. 3 muestra los diferentes tipos de máquinas para desmalezado y sus diferentes formas de electrodos dependiendo la aplicación a la que está destinada.



a)



b)



c)

Fig. 3. Sistemas eléctricos. a) Para campos abiertos (Zasso) b) Para aplicar entre líneas (Zasso) c) Para campos abiertos (Weed Zapper). [6]

### 2.3 Patentes Relacionadas al Proyecto

Existen empresas que han desarrollado tecnología en este rubro y las cuales han patentado sus productos. Se presenta aquí una de las principales patentes encontradas en la revisión bibliográfica perteneciente a una empresa brasileña [7].

- N° EP003557750A1
- Empresa: **Zasso Group AG**
- Fecha de presentación: **17.01.2019**
- Inventor: **Rona, Sérgio Alexandre** São Paulo (BR)

11. El circuito de la figura 4 a) representa el sistema eléctrico de la desmalezadora nombrada, donde posee una fuente de tensión de corriente alterna monofásica (1), que conduce este tipo de energía eléctrica a un rectificador de puente completo (2). Esta es transformada a corriente continua, y luego ingresa a un sistema inversor (3), compuesto por dos IGBT, para generar los pulsos de tensión de forma cuadrada a una determinada frecuencia. (4) es un filtro inductivo que reduce las componentes armónicas, y genera resonancia en el circuito para reducir pérdidas de energía. Para aumentar la tensión se instala un transformador de alta frecuencia (5), y un sistema multiplicador de tensión del tipo Cockroft-Walton (6), para ser aplicada hacia la carga, o maleza (7). La figura 4 b) es el esquema equivalente para un sistema trifásico.

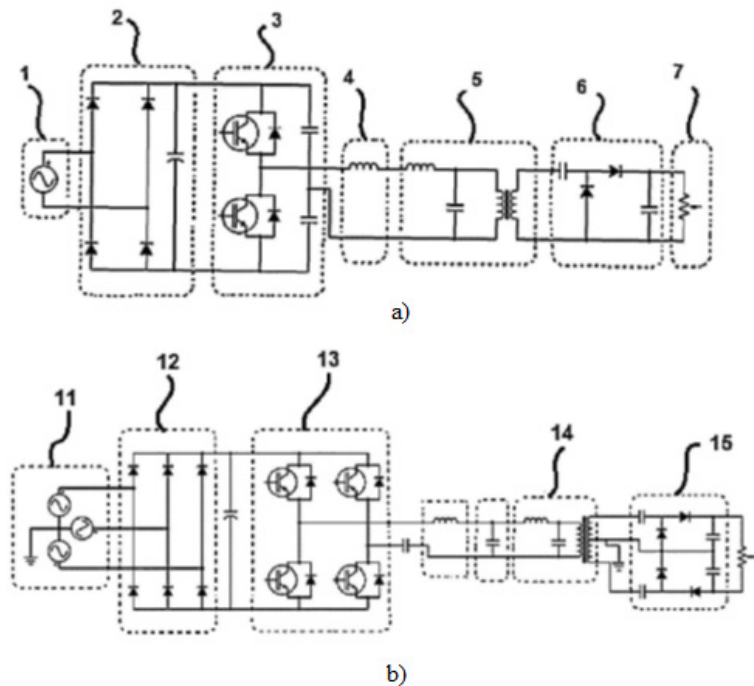


Fig. 4. Esquema del circuito eléctrico a) monofásico y b) trifásico [7].



### 3 Grado de Daño del Tejido Vegetal en Función del Campo Eléctrico

#### 3.1 Modelo Eléctrico Equivalente de una Célula Vegetal

Para comprender los efectos de la actuación de la energía eléctrica sobre una planta, se debe partir al comportamiento de sus células ante la aplicación de una determinada diferencia de potencial.

La conducción en un tejido vegetal depende de la resistencia del protoplasma y del líquido del espacio intercelular, mientras que todas las membranas y paredes realizan el almacenamiento de cargas eléctricas (polarización).

La polarización se produce en la membrana célula, donde las partículas cargadas como  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Cl^-$  y no pueden difundirse a través la membrana celular.

En su lugar, solo pueden cruzar las membranas a través de bombas iónicas y canales iónicos (poros) cuya apertura y cierre están regulados por la diferencia de potencial a través de la membrana [8].

A continuación, la figura 5 a) representa un modelo de circuito eléctrico, y 5 b) un esquema del tejido celular con las respectivas partes, donde:

$R_1$ : Resistencia del líquido del protoplasma.

$R_2$ : Resistencia del líquido del espacio intercelular.

$R_3$ : Resistencia de la membrana celular.

$C_M$ : Capacitancia de la membrana celular.

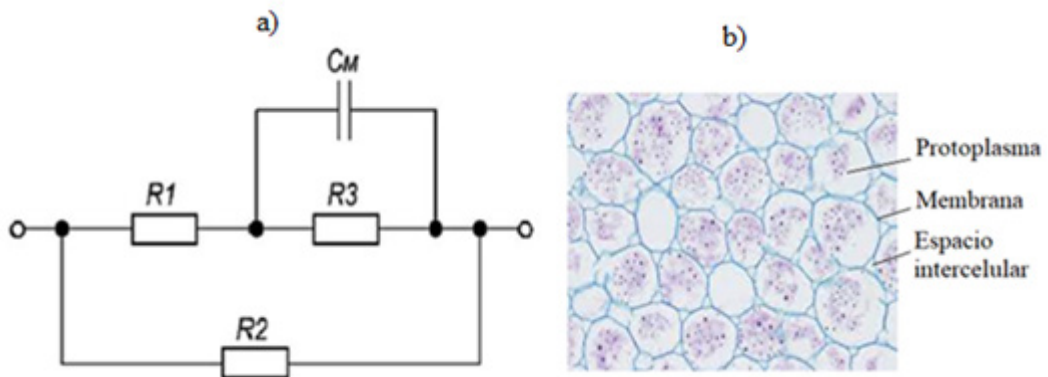


Fig. 5. a) Circuito eléctrico equivalente de una célula [3]. b) Conjunto de células de tejido vegetal [9]

#### 3.2 Dependencia de la impedancia a la frecuencia del campo eléctrico aplicado al tejido

El proceso de los iones que pasan a través de las membranas celulares está controlado principalmente por bombas iónicas y canales iónicos. A bajas frecuencias (50 Hz~1 kHz), los canales iónicos de la membrana celular se cierran porque el campo eléctrico de baja frecuencia produce pequeños cambios en la diferencia de potencial de la membrana, y estos cambios son demasiado pequeños para cambiar las características del canal iónico. En este caso, la impedancia de la membrana celular es tan alta que

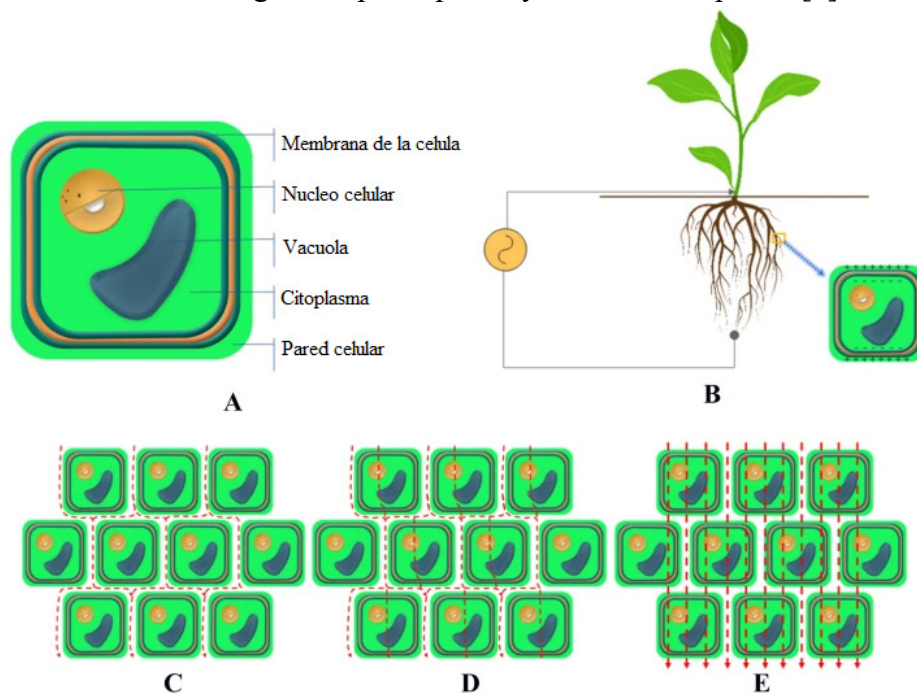


no deja pasar la corriente. Entonces, la corriente solo puede pasar a través del cuerpo extraplasmático (por fuera de las células), como se muestra en la Fig. 6 C.

A esta baja frecuencia, la impedancia total está determinada principalmente por la resistencia del fluido extracelular.

A medida que aumenta la frecuencia, el campo eléctrico aplicado en la superficie exterior de la membrana cambia la diferencia de potencial, lo que abre una puerta parcial de canales iónicos y flujo a través de la membrana. Bajo excitación de media frecuencia (1 kHz ~100 kHz), la corriente fluye a través de parte de la celda y a través de diferentes interfaces Fig. 6 D.

En altas frecuencias (100 kHz~1 MHz), la diferencia de potencial finalmente abre todos los canales iónicos, formando poros de mayor tamaño, superando el radio crítico permisible. Los poros formados no pueden cerrarse inmediatamente, escapando la savia del protoplasma hacia el espacio extracelular, aumentando la conductividad de este. Lo que permite que la corriente pase a través de las membranas de todas las células Fig. 6 E, por lo que la impedancia total generada será la combinación del apoplasto, líquido extracelular, membrana y citoplasma. Por supuesto, la frecuencia a la que se abren todos los canales iónicos varía según el tipo de planta y la edad de la planta [8].



**Fig. 6. Circulación de la corriente eléctrica en los tejidos vegetales, (C) en baja frecuencia, (D) media frecuencia, (E) alta frecuencia. [8]**

### 3.3 Grado de Daño del Tejido Vegetal

Definición del grado de daño del tejido vegetal  $S_n$  por [3]

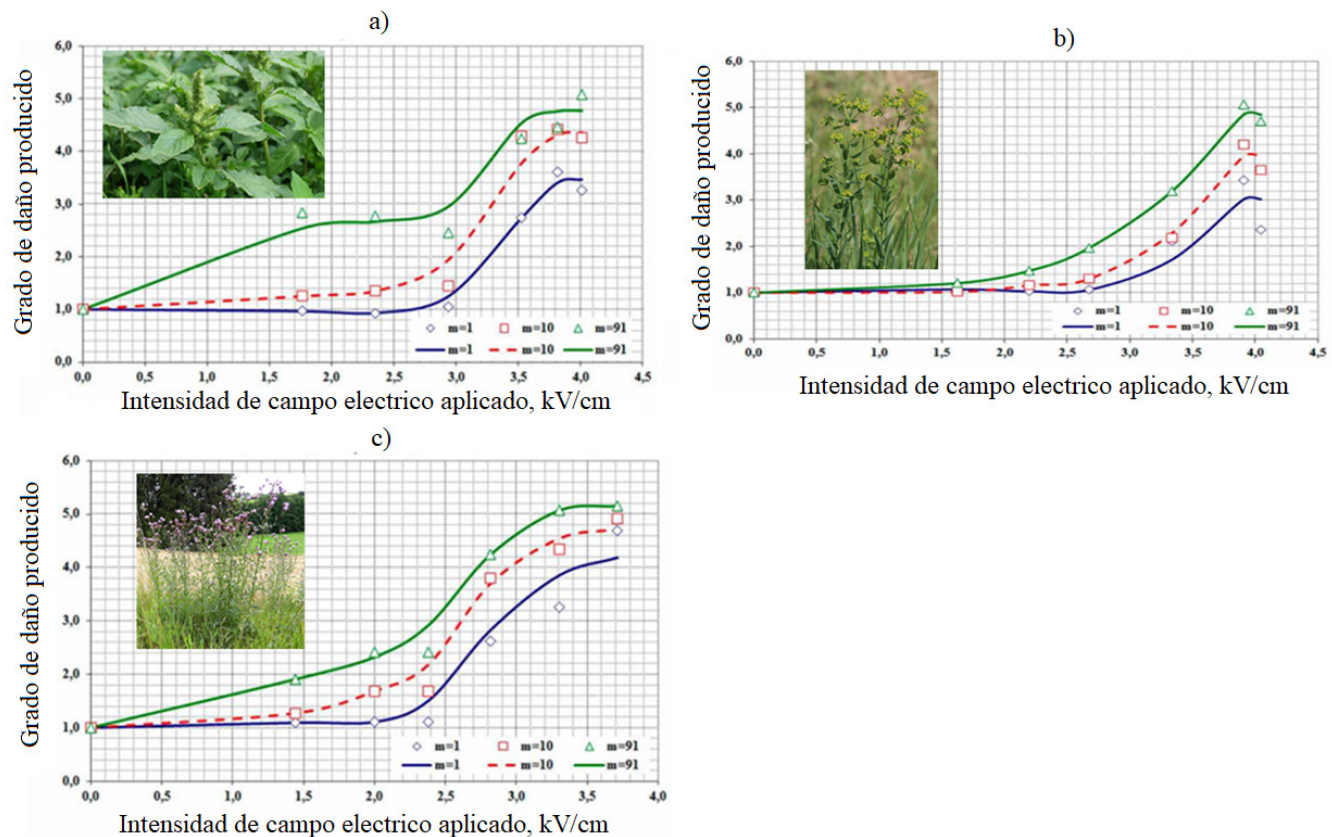
$$S_n = \frac{R_i}{R_f} - 1 \quad (1)$$

$S_n$ : Grado de daño.

$R_i$ : Impedancia del tejido, antes del daño.

$R_f$ : Impedancia del tejido, luego de aplicar pulsos de tensión.

En la siguiente figura se presenta las curvas de grado de daño de diferentes plantas, al aplicar distintos valores de tensión, asociado a un valor de campo eléctrico (E), y una cierta cantidad de pulsos (m) sobre el tejido vegetal.



**Fig. 7. Curvas de grado de daño, del tejido de la raíz de a) *Amaranthus retroflexus* L. (típica de América tropical), b) *Euphorbia virgata* L. (Norte América), y c) *Cirsium arvense* L. (Mediterráneo), dependientes de la intensidad de campo eléctrico (E) aplicado, a diferentes números de pulsos (m), y valores constantes de capacitancia del circuito de descarga ( $C=1000\mu\text{F}$ ), e inductancia ( $L=110\mu\text{H}$ ) [3].**

Se observa que, para estas plantas presentadas de diferentes características, se obtiene un comportamiento similar del grado de daño al campo eléctrico entre las mismas, además de que a mayor cantidad de pulsos aplicados las curvas se desplazan hacia arriba, por lo tanto, el grado de daño aumenta.

Las siguientes ecuaciones son las correlaciones formadas entre grado de daño con los distintos parámetros eléctricos de [3]. Indican las variables independientes, y la forma en cómo afectan para generar un aumento del grado de daño.

$$S_n = k_s \cdot E^n \cdot t \quad (2)$$

$$S_n = k_s \cdot \frac{R_p^{n-1} \cdot i^{n-2}}{l_p^n} \cdot m \cdot W \quad (3)$$

$$S_n = k_s \cdot \frac{R_p}{l_p^2} \cdot m \cdot W \cdot E^{n-2} \quad (4)$$

$$S_n = k_s \cdot \frac{\rho_p}{l_p \cdot F_p} \cdot m \cdot W \cdot E^{n-2} \quad (5)$$

$$S_n = k_s \cdot \frac{R_p \cdot C}{2} \cdot m \cdot E^n \quad (6)$$

$S_n$ : Grado de daño.

$k_s$ : Factor de proporcionalidad.

$E$ : Intensidad de campo eléctrico.

$i$ : Corriente eléctrica consumida.

$m$ : Cantidad de pulsos.

$W$ : Energía eléctrica consumida por pulso.

$R_p$ : Resistencia eléctrica de la planta.

$n$ : Índice de sensibilidad del tejido vegetal.

$C$ : Capacitancia del circuito de descarga.

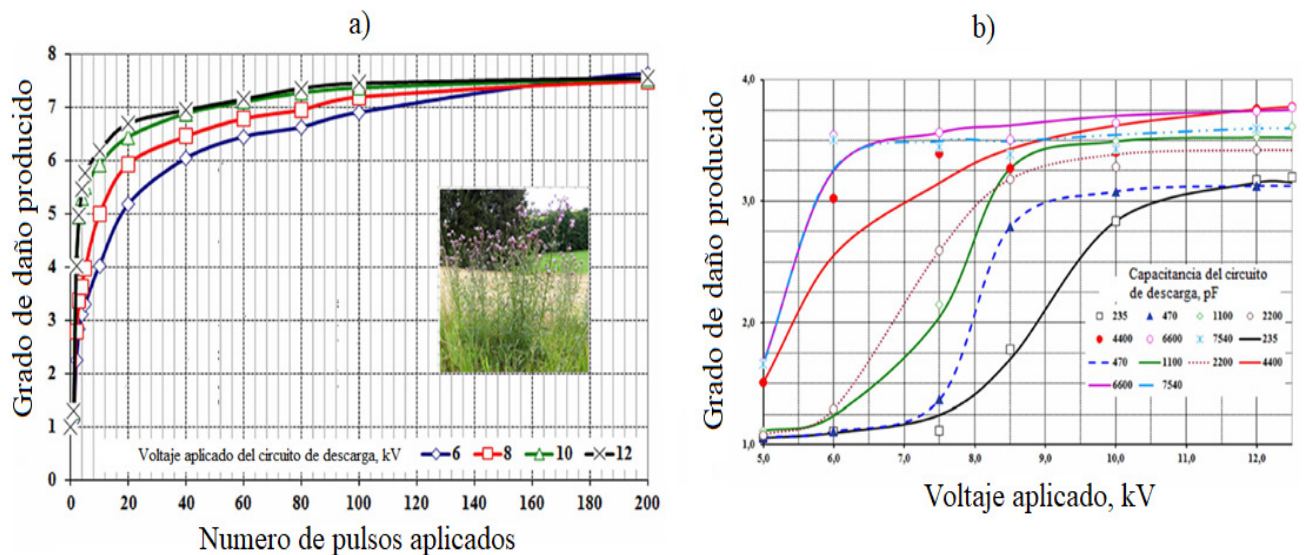
El índice de sensibilidad del tejido vegetal expresa el cambio en el grado de daño, cuando varía el campo eléctrico aplicado. En la siguiente tabla se presentan valores medios de este índice por [3] para las distintas malezas, y en distintos sectores de las mismas.

**Tabla 2:** Valores medios del índice de sensibilidad n. [3]

Maleza	Tallo	Cuello de raíz	Raíz	Promedio
Cirsium arvense	1,15	1,24	1,22	1,20
Sanchus arvensis	1,19	1,23	1,25	1,22
Euphorbia virgata	1,06	1,21	1,14	1,14
Lactuca tatarica	1,17	1,25	1,26	1,23
Amaranthus retroflexus	1,22	1,31	1,21	1,25
Promedio	1,16	1,25	1,22	1,21

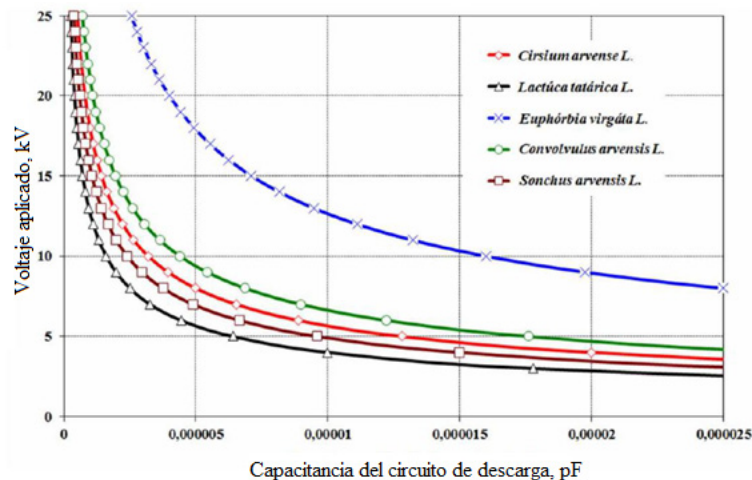
A continuación, en la figura 8 a), es importante destacar que a partir de determinados valores de pulsos de tensión aplicados (mayores a 100), el grado de daño tiende a sus límites máximos para los distintos valores de voltaje aplicado.

Se observa en la figura 8 b) cómo cambian las curvas del grado de daño del tejido vegetal, cuando se tienen distintas capacidades de descarga. Donde a mayores capacitancias en el circuito de descarga se desplaza hacia arriba a las curvas de grado de daño.



**Fig. 8.** Curvas de grado del daño, (a) en función de la cantidad de pulsos aplicados, y distintos valores del voltaje, sobre el tejido de la raíz de *Cirsium arvense* L. ( $C=8,615\text{nF}$ ,  $L=110\mu\text{H}$ ). Y (b) en función del voltaje aplicado, para distintas capacidades de descarga, sobre el tejido de la raíz de *Amaranthus retroflexus* L. [3].

A continuación, se muestran las combinaciones del voltaje aplicado y la capacitancia del circuito de descarga, para que, con la mínima energía de actuación, sea capaz de dañar irreversiblemente el tejido vegetal de diversas malezas, reflejando comportamientos similares para 5 malezas distintas.



**Fig. 9.** Curvas del voltaje aplicado en función de la capacitancia de descarga y mínima energía de actuación, para distintas malezas [3].

La energía específica consumida para realizar cada grado de daño máximo posible de [3], fueron:

**Tabla 3:** Grados de daño y energía eléctrica específica consumida (J/cm<sup>3</sup>). [3]

Maleza	Sección	Rango del grado de daño limite	Rango de energía eléctrica específica
Cirsium arvense	Tallo	5,6-7,4	2,4-8,1
	Cuello de raíz	5,2-6,3	2,8-10,3
	Raíz	5,3-7,3	2,9-14,3
Sanchus arvensis	Tallo	4,8-7,7	3,3-15,2
	Cuello de raíz	4,6-7,3	4,1-16,4
Euphorbia virgata	Tallo	4,8-4,7	4,9-24,7
	Cuello de raíz	4,5-3,9	5,6-12,7
	Raíz	4,3-4,3	5,1-15,2
Lactuca tatarica	Tallo	5,6-7,4	3,8-6,8
	Cuello de raíz	5,8-6,9	3,3-8,4
	Raíz	5,0-7,7	2,6-8,7
Amaranthus retroflexus	Tallo	4,1-7,1	3,4-8,2
	Cuello de raíz	4,4-6,7	3,1-7,2
	Raíz	3,6-6,6	3,9-7,8

### 3.4 Medición de parámetros eléctricos en un tejido vegetal

Este ensayo consistió en aplicar pulsos de voltaje cuadrado de amplitud  $U = 2,5$  kV, y 10kHz de frecuencia a un tejido vegetal no dañado del tallo de la maleza *Amaranthus retroflexus* de longitud 20,4 mm y un diámetro de 1,95 mm. Los oscilogramas de la figura 10, muestran el proceso transitorio del deterioro del tejido, donde: a) el voltaje aplicado, y desde b) las distintas corrientes que circularon para cada pulso aplicado al tejido, donde se puede apreciar la forma de corriente del tipo capacitiva al inicio b), c), d), y como esta tiende a la forma de corriente resistiva e), f) [3]. Obteniendo los parámetros  $i_{fr}$ ,  $i_c$ ,  $\tau$ ,  $R_n$ , y utilizando las siguientes ecuaciones simplificadas [3] hallaron los valores de las componentes del esquema del circuito eléctrico de la figura 5 a), pero para el tejido vegetal, con un error comprendido entre 10-20 %.

$$R_1 \approx \frac{U}{i_{fr}} \quad (7)$$

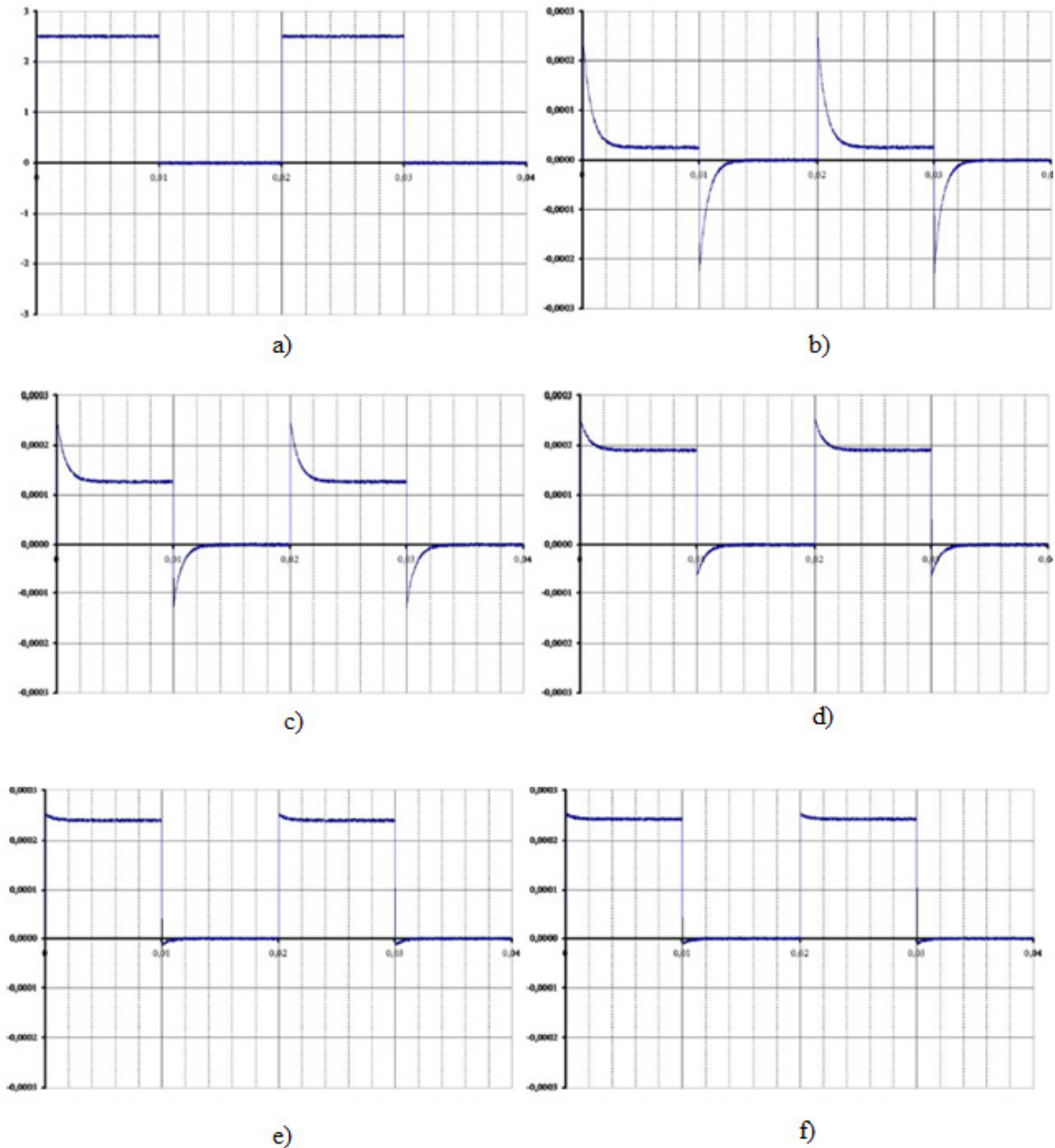
$$R_2 \approx \frac{U}{i_c} - R_n \quad (8)$$

$$R_3 \approx \frac{U \cdot (R_1 + R_2) - i_c \cdot (R_n \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2)}{U - i_c \cdot R_2} \quad (9)$$

$$C \approx \frac{\tau \cdot (R_n + R_2)}{R_n \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2} \quad (10)$$

Donde  $i_c$  e  $i_{fr}$  son las corrientes libre y forzada del proceso transitorio.

$\tau$ : Constante de tiempo.  $R_n$ : Resistencia de derivación.



**Fig. 10.** Oscilogramas de a) pulsos de voltaje, y corriente de circulación b) antes del daño, c) d) e) f) bajo la acción de pulsos eléctricos, sobre el tejido del tallo de *Amaranthus retroflexus* L. [3].

En la siguiente tabla se obtienen los valores de los parámetros calculados por [3] en función de las respectivas corrientes y tensión de los oscilogramas, con las ecuaciones 7, 8, 9, 10. Donde se aprecia el cambio de las resistencias, y la tendencia de  $R_2$  y  $R_3$  hacia los valores de  $R_1$ .



**Tabla 4:** Parámetros calculados R ( $\Omega$ ), C (pF) [3]

Numero de pulsos aplicados (m)	$R_1$	$R_2$	$R_3$	C
0	15595,24	92380,95	853423,81	165,93
1	12395,83	21159,42	44772,11	380,48
2	9907,41	13626,37	18567,79	523,13
3	9545,45	12164,95	14798,59	598,65
4	9026,55	11078,43	12273,16	686,16
5	8695,65	9907,41	9299,06	746,03
6	7916,67	8859,65	7849,29	840,14

La siguiente expresión explica el cambio en la capacitancia eléctrica de la membrana cuando aparece un defecto estructural en el poro (aumento en su radio) [3].

$$\Delta C = \pi \cdot r^2 \cdot C_0 \cdot \left[ \frac{\epsilon_s}{\epsilon_m} - 1 \right] \quad (11)$$

$\Delta C$ : Aumento de capacidad.

$r^2$ : Radio del poro.

$C_0$ : Capacidad de la membrana por unidad de area.

$\epsilon_s \approx 80$ : Permeabilidad dieléctrica del agua.

$\epsilon_m \approx 2-3$ : Permeabilidad dieléctrica del lípido de la membrana.

### 3.5 Función de Cole-Davidson diagramas de Nyquist

La función de Cole-Davidson, es una herramienta eficiente para describir el comportamiento de los tejidos vegetales a distintos niveles de la frecuencia de la fuente de voltaje.

La función de Cole-Davidson es [10]:

$$Z_{CD}(s) = \frac{Z_0}{(1+\tau s)^\alpha} \quad (12)$$

$Z_{CD}$ : Impedancia del tejido en función de la frecuencia.

$Z_0$ : Impedancia característica del tejido.

$\tau = 1/\omega_0$  : Constante de tiempo, relacionada con la frecuencia característica  $\omega_0$  del material.

La constante de tiempo puede asociarse físicamente con el tiempo de relajación de un material ( $\tau \approx \tau_{rel}$ ) [11].

$\alpha = [0 ; 1]$  : Coeficiente de dispersión.

$s = j \cdot \omega$  : Operador Laplaciano.

En la siguiente figura se presenta el circuito eléctrico utilizado y los diagramas de Nyquist, de los ensayos de [10], donde se observa cómo cambia el valor de la impedancia vegetal cuando varía la frecuencia. Aquí  $R_\infty$  es la resistencia del protoplasma,  $R_0$  la intercelular, y  $Z_m$  representa la impedancia de las membranas celulares, de las células en el tejido. En los límites, a muy bajas frecuencias la impedancia es igual a la resistencia intercelular  $R_0$ , y a muy altas frecuencias es igual a la resistencia  $R_\infty$  (resistencia del protoplasma).



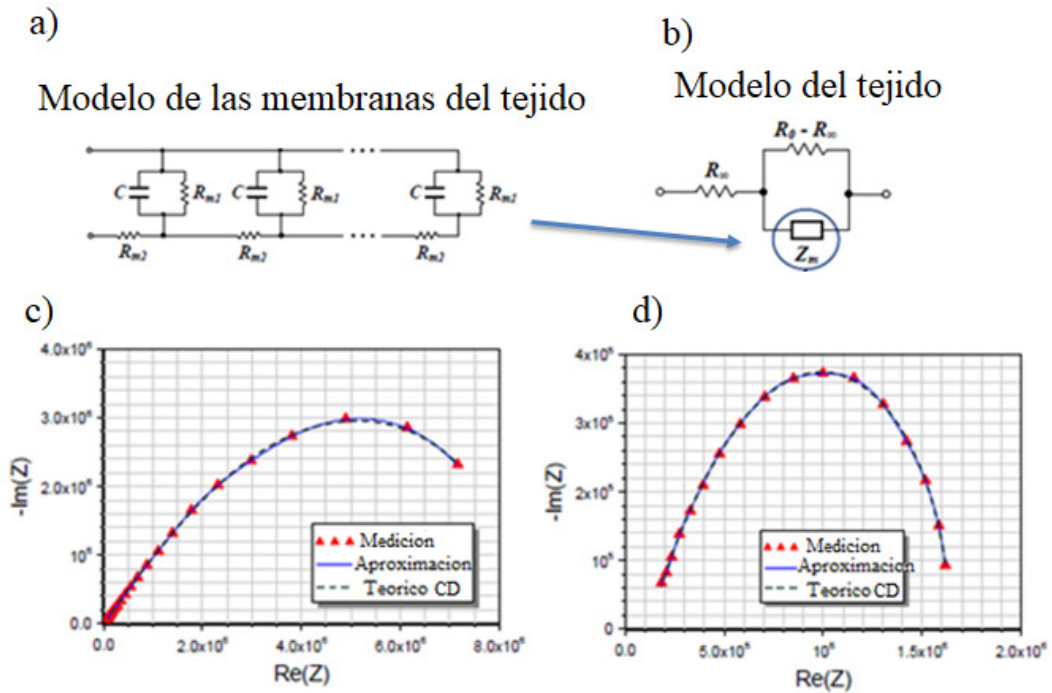


Fig. 11. Esquema eléctrico de a) las membranas celulares, b) en un tejido vegetal, y sus respectivos espectros de impedancia (diagramas de Nyquist), (c) sobre la membrana celular y (d) sobre el tejido total. Comparando la función de Cole-Davidson (teórico), aproximación mediante una función de transferencia, y mediciones sobre el tejido. La frecuencia aumenta de derecha a izquierda [10].

### 3.6 Representaciones de circuitos eléctricos equivalentes para el tallo de una planta y sus raíces

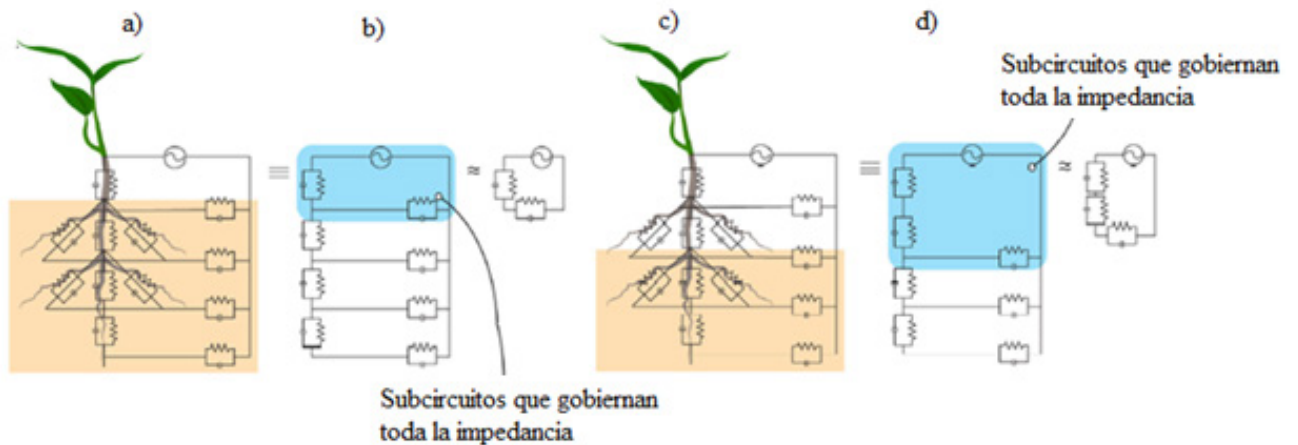


Fig. 12. Modelo de Dalton a) sin raíces por fuera del suelo, c) con raíces por fuera del suelo, b) y d) los respectivos circuitos eléctricos equivalentes [12].

Utilizando un medidor de impedancias, [8] registraron los valores de resistencia y reactiva para distintos niveles de frecuencia (50Hz – 100kHz) formando los espectros de la figura 13 b). Cada curva corresponde con la posición del electrodo E1 al variar la altura desde la base del tallo, entre 2 a 5 cm.

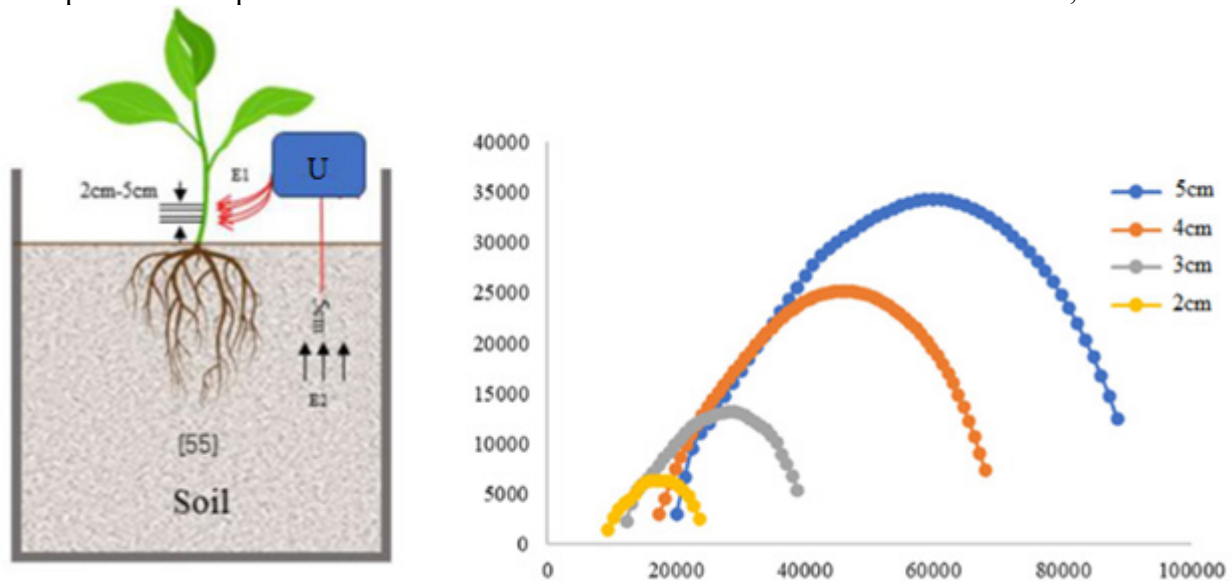


Fig. 13. a) Esquema de medición de impedancia in situ, b) espectro de impedancia correspondiente [8].

Se observa como los espectros de impedancia tienen el mismo patrón comparado con los diagramas de Nyquist (figura 11), lo que valida la interpretación de que el circuito eléctrico de toda la planta es similar al de un tejido, y al de la célula.

Se demuestra que las malezas que son la carga eléctrica de la maquina es del tipo RC, resistiva y capacitiva. Y sus parámetros serán grandes dependientes de la frecuencia de los pulsos de tensión aplicados sobre ellas. Donde estos parámetros se minimizan elevando la frecuencia. Entonces es conveniente que los pulsos de tensión aplicados posean esta característica.

El grado de daño causado, demuestra que, para un determinado valor de voltaje o campo eléctrico aplicado, al aumentar los pulsos el grado de daño aumenta.

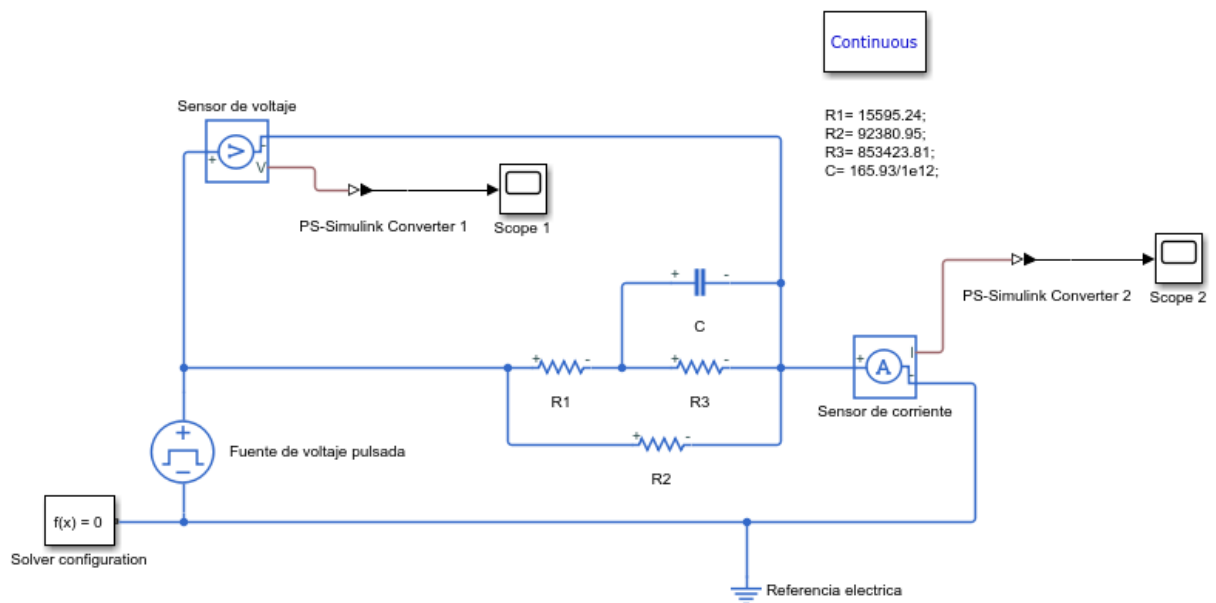
Se pueden obtener datos de impedancias para distintas plantas y caracterizarlas con los circuitos eléctricos presentados. Donde en un principio este se comporta como una carga capacitiva, y a medida que aumentan los pulsos aplicados a una determinada frecuencia, esta tiende a ser una carga resistiva (con el valor aproximado a la resistencia del protoplasma), de manera irreversible. Por lo tanto, las plantas se dañan permanentemente y este efecto las destruye en pocos días.

## 4 Estado de Avance del Proyecto. Diseño Técnico

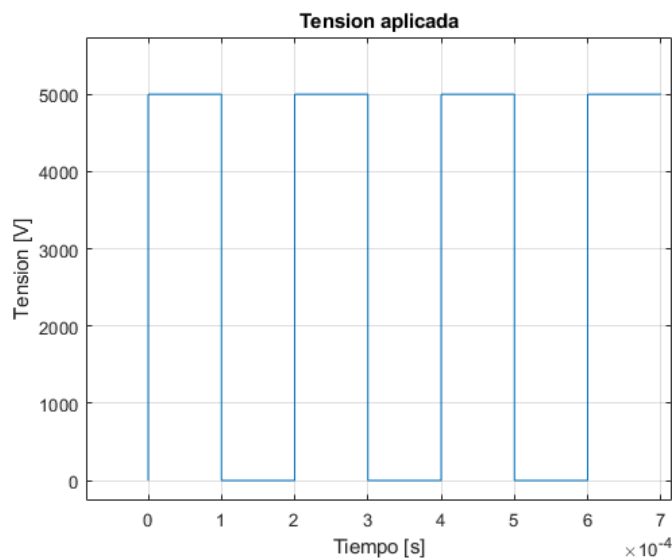
### 4.1 Simulaciones Iniciales

En función a lo expuesto anteriormente, se procedió a realizar un modelo eléctrico mediante Simulink de Matlab [13], en el cual se realizaron simulaciones de tensión aplicada (5kV, 10kHz, onda

cuadrada) y corriente de circulación sobre una impedancia. La Fig. 14 muestra la interfaz de Simulink, la impedancia eléctrica utilizada es el modelo obtenido de [3] (figura 5a), representada por  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , y  $C$ . Estos parámetros son cargados en su respectivo bloque donde se optó por utilizar los valores de [3], tabla 4 ( $m = 0$ ), también mostrados en la figura 14. La fuente de voltaje pulsada genera la curva de la figura 15, medida con el sensor de voltaje y enviada al Scope 1 (osciloscopio 1). Y la corriente total del circuito mostrada en la figura 16, es medida mediante el sensor de corriente, y enviada al Scope 2.

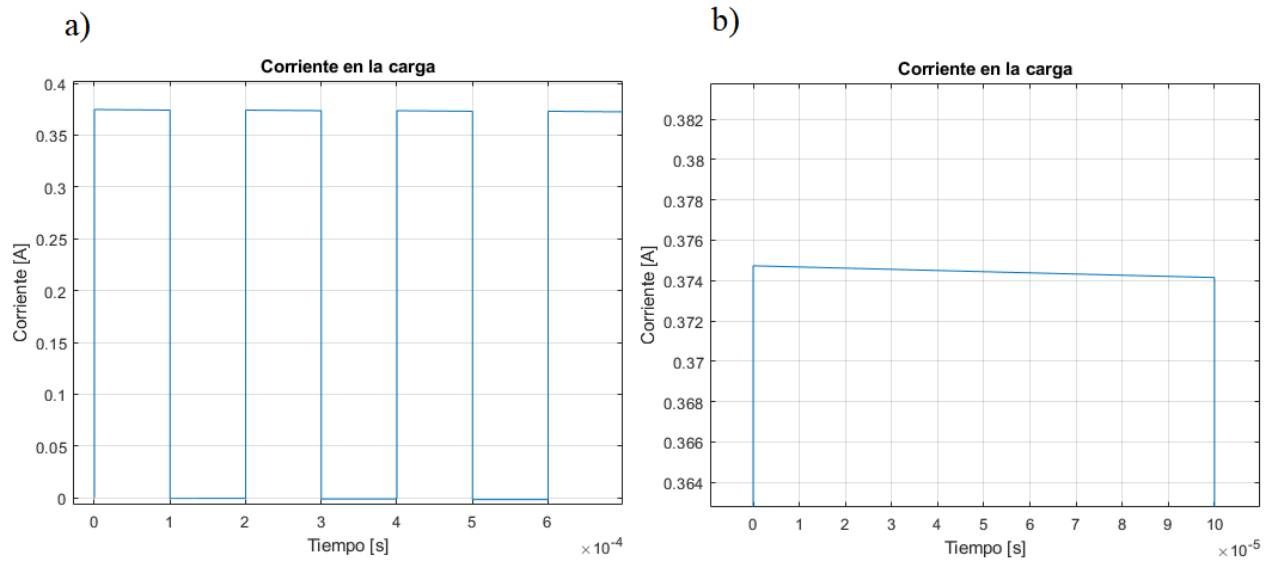


**Fig. 14. Esquema del circuito eléctrico del tejido vegetal en Simulink.**



**Fig. 15. Forma de onda del voltaje pulsado aplicado.**

En la figura 16 se muestra la forma de onda de la corriente total del circuito, que se obtuvo de la simulación. Se observa en la figura 16 a) que la corriente tiene un comportamiento prácticamente del tipo resistivo, que fue esperado dado el valor de frecuencia aplicada relativamente grande. Aunque al realizar un zoom se obtuvo la figura 16 b), donde se aprecia un pequeño efecto de descarga capacitiva.



**Fig. 16. Curva del voltaje aplicado y corriente de circulación, a) Corriente total en la carga, b) Zoom de la curva de corriente.**

#### 4.2 Especificación de Parámetros de Diseño

Mediante los estudios realizados se proponen los parámetros de diseño, en el cual el sistema funcionara, tensión de pico 5 kV, con forma de onda cuadrada continua, de frecuencia 10 kHz.

Considerando que la velocidad del tractor, y por lo tanto la del electrodo será:

$$v = \frac{1 \text{ m}}{6 \text{ s}}$$

Se define al recorrido de contacto (10cm), al recorrido realizado por el electrodo mientras permanece en contacto con la maleza, este determina el tiempo de contacto (t), en que la maleza permanece en contacto con el electrodo. A partir de la definición de velocidad, se calcula t.

$$t = \frac{\text{Recorrido de contacto}}{v} = \frac{0,1\text{m}}{\frac{1\text{m}}{6 \text{ s}}} = 0,6\text{s} \quad (13)$$

La cantidad de pulsos (m) aplicados por definición de frecuencia (f), en 10kHz, son:

$$m = f \cdot t = 10000 \frac{\text{pulsos}}{\text{s}} \cdot 0,6\text{s} = 6000\text{pulsos} \quad (14)$$

Dado la cantidad de pulsos aplicados, y basándonos en los resultados que [3] obtuvieron en las figuras 7 y 8, consideramos que logramos así el máximo grado de daño, ósea que la impedancia de la planta posee el valor correspondiente a la resistencia del protoplasma  $R_1$  [3]. A partir de ello se calcula la potencia media, y la correspondiente energía para una maleza, y luego para 10 malezas de igual valor de resistencia. Proponiendo el valor de resistencia que fue utilizado en la simulación de [13], que es:  $R = 15595,24\Omega$ .

$$p_{med} = V_{med} \cdot I_{med} = \frac{V_{med}^2}{R} \quad (15)$$

Para una onda cuadrada positiva el valor medio resulta:

$$V_{med} = \frac{V_{pico}}{2} = \frac{5000V}{2} = 2500V \quad (16)$$

$$p_{med} = \frac{(2500V)^2}{15595,24\Omega} = 400,76W \quad (17)$$

$$E_{med} = p_{med} \cdot t = 400,76W \cdot 0,6s = 240,5 J \quad (18)$$

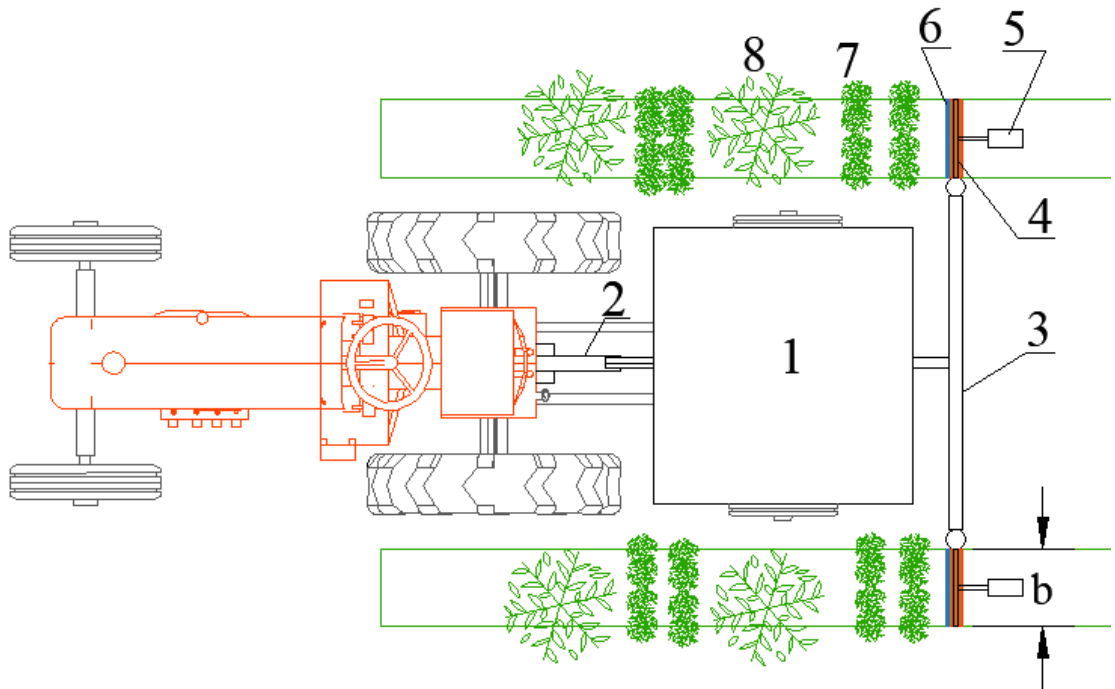
Se considera que cada electrodo es capaz de contactarse con cinco malezas como máximo, y como la desmalezadora tiene dos electrodos, (ver figura 17) la potencia media necesaria, es:

$$p_{med\ total} = 2 \cdot 5 \cdot 400,76W = 4007,6W \approx 4kW \quad (19)$$

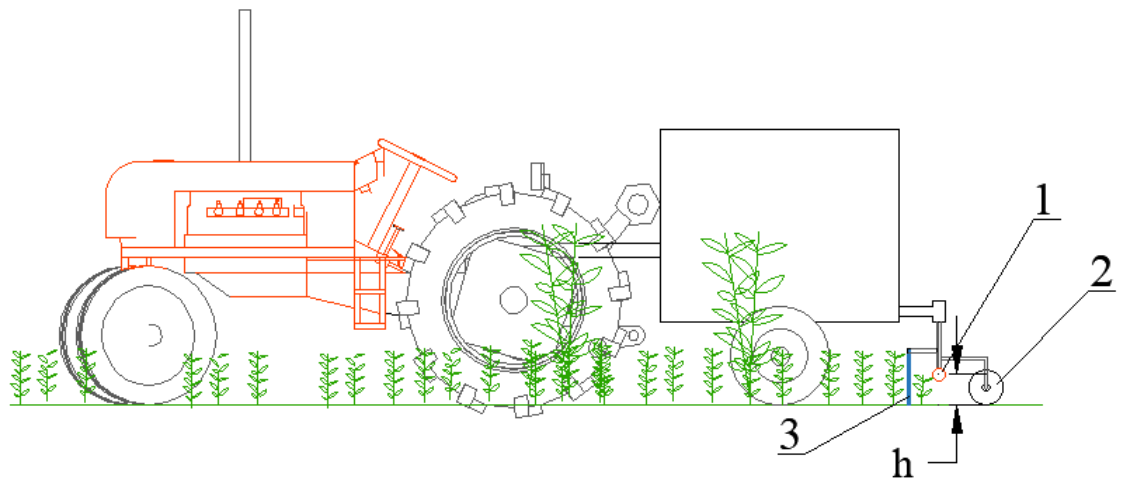
Y la energía media necesaria correspondiente, es:

$$E_{med\ total} = 2 \cdot 5 \cdot 240,5 J = 2405J \quad (20)$$

### 4.3 Esquema básico de la desmalezadora



**Fig. 17. Vista superior del esquema: (1) desmalezadora montada, (2) toma de fuerza del tractor, (3) sistema porta electrodos, (4) electrodo positivo, (5) rueda electrodo negativo, (6) cobertor aislante, (7) malezas, (8) planta de yerba, (b) ancho de barrido.**



**Fig. 18. Vista lateral del esquema: (1) electrodo positivo, (2) rueda electrodo negativo, (3) cobertor aislante, (h) altura de contacto.**

#### *4.4 Elementos principales de la desmalezadora*

##### Toma de fuerza del tractor

Entrega energía mecánica generada por el motor de combustión interna del tractor.

##### Sistema de transmisión mecánica

Debe ser capaz de recibir la energía mecánica de la toma de fuerza, y modificar su régimen de giro, al necesario por el generador eléctrico.

##### Generador trifásico asincrónico

Genera la energía eléctrica a partir de energía mecánica.

##### Rectificador trifásico

Transforma una señal alterna trifásica, a continua.

##### Convertidor C-C

Es capaz de transformar la señal de entrada a este elemento, de continua con un determinado nivel de tensión (ejemplo 400V), a la requerida por la desmalezadora, pulsada 10kHz, onda cuadrada, con mayor nivel de tensión 5kV, en la salida del convertidor.

##### Electrodos

El porta electrodos debe ser capaz de soportar ambos electrodos, y transmitir por su interior los conductores activos hacia ellos. Los electrodos positivos son capaces de transmitir la energía eléctrica de forma pulsada a la planta. Está conformado por una barra de forma cilíndrica, de cobre. Debe estar suspendido a una determinada altura  $h$ , que está limitada por el hecho de que si  $h$  es muy pequeña puede contactarse con el suelo cuando este no es uniforme, o que se produzcan arcos no deseados. Mientras más alta es la altura de contacto realizara la descarga en mayor longitud del tallo, siendo esta la parte de la planta que es irrelevante invertir energía, ya que las raíces son el blanco para destruir la planta. El ancho del electrodo corresponde con el ancho barrido, siendo este  $b = 30\text{cm}$ .

En el momento que el sistema de electrodos se contacte (choque) con el tallo de la planta de yerba, este pivotea sobre un eje vertical, y hará que se esquivé la planta de yerba sin dañarla mecánicamente y eléctricamente, donde por un sistema de resortes tiene la capacidad de volver a su estado normal.

El cobertor aislante debe mantener al sistema de electrodos aislado de la planta a proteger (yerba), y ser capaz de dejar pasar a la maleza al sector del electrodo.

El electrodo negativo, con forma de rueda para que se incorpore una cierta fracción a la tierra y así mejorar el contacto eléctrico con la tierra.

## **5 Conclusiones**

Con el estudio realizado se ha logrado determinar los parámetros de diseño del sistema eléctrico, en función de que los tejidos vegetales como impedancias eléctricas dependen gravemente de la frecuencia de la tensión aplicada, y por ello asegurar el daño requerido sobre las mismas. Este es el paso principal y uno de los más importantes para el desarrollo del proyecto.

Hasta el momento se ha logrado alcanzar algunos objetivos específicos del proyecto de forma teórica, uno de ellos es que deberá operar satisfactoriamente sobre plantas de hasta 20 cm de altura como máximo. Esto se logra debido a que con el diseño pretendido la corriente sería aplicada al tallo de la planta lo más cerca posible de la raíz.



Un objetivo logrado es que se garantizó de [3] que la eliminación de las malezas se lleva a cabo en un periodo de 5 a 10 días, posterior a la aplicación de la energía eléctrica . Mediante los estudios realizados, las plantas se destruyen internamente en el momento de la aplicación de corriente, provocando una descomposición de los tejidos desde sus células.

Además, como trabajo a futuro sería interesante realizar ensayos de medición de impedancia sobre las plantas afectadas directamente a la provincia de Misiones.

## 6 Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo de la cátedra Proyecto electromecánico 2 correspondiente a la carrera de ingeniería electromecánica en la cual se cuenta con la guía del ing. Mario Oliveira y del ing. Martín Puertaz como tutores.

## 7 Referencias

- [1] INYM, Superficie cultivada, marzo 2022.
- [2] Dr. Jorge Kaczewer, Toxicología del glifosato: riesgos para la salud humana, 2002.
- [3] I. V. Yudaev, Electro-Impulse Irreversible Plant Tissue Damage as Highly Efficient Agricultural Technology, Mar 2020.
- [4] Miguel Angel Escalona, Agricultura sin glifosato: Alternativas para una transición agroecológica, Ciudad de México, 2021.
- [5] Saban Ozdemir, Review of Standards on insulation Coordination for Medium Voltage Power Converters, Mar 2021.
- [6] Manejo ecológico integral de arvenses en México.
- [7] Rona, Sérgio Alexandre, “Weed inactivation device” U.S. Patent EP3557750A1, Ene. 17, 2019.
- [8] Yang Liu, Electrical impedance spectroscopy (EIS) in plant roots research: a review, Nov 2021.
- [9] Atlas de Histología Vegetal y Animal.
- [10] Stavroula Kapouela, Realization of Cole–Davidson Function-Based Impedance Models: Application on Plant Tissues, Nov 2020.
- [11] R. G. Ramirez, “Sistema de medición multifrecuencia de impedancia eléctrica en tejidos biológicos,” Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Universidad Nacional de Mexico., Cd, Mx, 2019.
- [12] Solomon Ehosioko, Sensing the electrical properties of roots: a review, Oct 2020.
- [13] Mathworcks, Matlab R2019a, Simulink. Aviable: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.