



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

# MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXCITACIÓN DE ELECTRODOS DE APLICACIÓN EN PROCESOS DE ELECTROFERMENTACIÓN

*Autor:*

GARCÍA FREILE, CELIA

*Tutoras:*

DEL VALLE GONZÁLEZ, MARÍA ISABEL

Departamento TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

GARCÍA CUBERO, MARÍA TERESA

Departamento INGENIERÍA QUÍMICA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE

Valladolid, marzo, 2025

## RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

El presente Trabajo de Fin de Máster se enfoca en el desarrollo de un sistema de excitación de electrodos para su aplicación en procesos de electrofermentación, es decir, fermentaciones en las que se introduce una corriente eléctrica para influir en la actividad microbiana. Para ello, se ha desarrollado un software utilizando la plataforma de programación gráfica LabVIEW, complementado con una tarjeta de adquisición de datos y una placa de circuito impreso diseñada específicamente para esta aplicación, permitiendo tanto la lectura como la aplicación de señales en el reactor.

El sistema desarrollado ofrece al usuario la capacidad de excitar los electrodos con diversas formas de onda, entre las que se incluyen el escalón, la onda cíclica y la onda cuadrada, entre otras. Además, posibilita la configuración de los parámetros de la onda, permitiendo adaptar la metodología operativa a las necesidades específicas de cada microorganismo y bioproceso.

Los datos generados durante los experimentos se almacenan en archivos Excel, facilitando su posterior análisis. Este sistema tiene como objetivo proporcionar una herramienta versátil y fácil de manejar para el usuario, a la vez que sirve como una plataforma de investigación que permite evaluar el impacto de la aplicación de corrientes eléctricas en diferentes bioprocesos.

### **Palabras clave:**

Sistema de excitación de electrodos, Electrofermentación, LabVIEW, Tarjeta de adquisición de datos, Placa de circuito impreso, Bioprocesos

## ABSTRACT AND KEY WORDS

The present Master's Thesis focuses on the development of an electrode excitation system for its application in electrofermentation processes, which are fermentation processes in which an electric current is introduced to influence microbial activity. To achieve this, software has been developed using the LabVIEW graphic programming platform, complemented by a data acquisition card and a printed circuit board specifically designed for this application, enabling both the reading and application of signals in the reactor.

The developed system allows the user to excite the electrodes with various waveforms, including step, cyclic, and square waves, among others. Additionally, it enables the configuration of waveform parameters, allowing the operational methodology to be adapted to the specific needs of each microorganism and bioprocess.

The data generated during the experiments are stored in Excel files, facilitating subsequent analysis. This system aims to provide a versatile and user-friendly tool, while also serving as a research platform that enables the evaluation of the impact of applying electric currents in different bioprocesses.

**Key words:**

Electrode excitation system, Electrofermentation, LabVIEW, Data acquisition card, Printed Circuit Board, Bioelectrochemistry.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción al proyecto	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Descripción de la memoria	3
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>5</b>
2.1	Proceso de Fermentación y Biorreactores	6
2.2	Principio de funcionamiento de la electrofermentación	8
2.3	Diseño de sistemas de electrofermentación	13
2.4	Electrodos en electrofermentación	17
2.5	Antecedentes de estudios en electrofermentación	19
2.6	Aplicación de formas de voltaje basadas en Técnicas Voltamétricas	23
2.6.1	Cronoamperometría (Escalón)	25
2.6.2	Voltametría de barrido lineal (Rampa)	25
2.6.3	Voltametría cíclica	27
2.6.4	Voltametría de onda cuadrada	28
2.6.5	Voltametría de pulso diferencial	29
<b>3</b>	<b>DESARROLLO DEL HARDWARE DEL EQUIPO</b>	<b>30</b>
3.1	Instrumentación electrónica	30
3.2	Instrumentación virtual	30
3.3	Tarjeta de adquisición	33
3.4	Diseño y construcción del sistema de experimentación	36
3.5	Circuito para la integración del sistema de medición de corriente	37
3.6	Diseño de la PCB para el circuito de medición de corriente	42
<b>4</b>	<b>DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO</b>	<b>46</b>
4.1	Características generales de LabVIEW	46
4.2	Software desarrollado	48
4.2.1	Funcionamiento general del software	48
4.2.2	Pantalla de inicio	50
4.2.3	Menú de selección de la forma de onda	53
4.2.4	Configuración del experimento, ejecución y registro de valores	55
4.2.5	Generación de las formas de onda	66
	ESCALÓN:	66
	RAMPA:	71
	ONDA CÍCLICA:	73
	ONDA CUADRADA:	77
	PULSO DIFERENCIAL:	80
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTOS REALIZADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>83</b>
5.1	Materiales usados	83

5.2	Ensayos previos con fuente de tensión.....	85
5.3	Ensayos con el sistema desarrollado.....	89
<b>6</b>	<b>ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	<b>94</b>
6.1	Tiempo invertido y costes de personal.....	94
6.2	Costes materiales asociados al proyecto.....	96
6.3	Costes indirectos.....	97
6.4	Costes totales.....	98
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....</b>	<b>99</b>
7.1	Conclusiones.....	99
7.2	Posibles líneas de futuro.....	100
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>101</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>106</b>
9.1	Datos recopilados durante las pruebas preliminares.....	106
9.2	Datos recopilados durante los ensayos con el sistema desarrollado.....	108
9.3	Corriente medida durante los ensayos con el sistema desarrollado.....	111
9.4	Manual de usuario.....	113

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema de un sistema bioelectroquímico [1].....	5
Ilustración 2. Curva de crecimiento típica de una población bacteriana [4].....	7
Ilustración 3. Resumen de las posibles configuraciones de los sistemas bioelectroquímicos [6].....	9
Ilustración 4. División conceptual de las reacciones catabólicas y anabólicas para calcular una reacción de crecimiento general [7].....	10
Ilustración 5. Mecanismo de fermentación anódico y catódico [6].....	12
Ilustración 6. Configuración del dispositivo de campo eléctrico microbiano. [10].....	20
Ilustración 7. Parámetros cinéticos experimentales para las fermentaciones de <i>S. cerevisiae</i> a diferentes voltajes aplicados. Letras diferentes indican significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Los resultados se reportan como la media $\pm$ desviación estándar ( $n = 3$ ). [9].....	21
Ilustración 8. Parámetros cinéticos experimentales para las fermentaciones de <i>Z. mobilis</i> a diferentes voltajes aplicados. Letras diferentes indican significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Los resultados se reportan como la media $\pm$ desviación estándar ( $n = 3$ ). [9].....	22
Ilustración 9. Clasificación de las técnicas voltamétricas.....	24
Ilustración 10. Forma de onda y respuesta de una cronoamperometría [12].....	25
Ilustración 11. Voltamograma resultante de un barrido lineal [13].....	26
Ilustración 12. Serie de voltamogramas de barrido lineal registrados a diferentes velocidades de escaneo para una solución electrolítica [13].....	26
Ilustración 13. Voltagrama resultante de una voltametría cíclica [13].....	27
Ilustración 14. Serie de voltamogramas de voltametría cíclica registrados a diferentes velocidades de escaneo [13].....	28
Ilustración 15. Voltagrama resultante de una voltametría de onda cuadrada [15].....	28
Ilustración 16. Voltagrama resultante de una voltametría de pulso diferencial [15]..	29
Ilustración 17. Logo del software de instrumentación virtual LabVIEW [19].....	32
Ilustración 18. Esquema del proceso de transformación se señales físicas a salidas digitales [20].....	33
Ilustración 19. Tarjeta NI USB 6008 [22].....	35
Ilustración 20. Conexiones tarjeta NI USB 6008 [23].....	35
Ilustración 21. Especificaciones de las salidas analógicas de la tarjeta NI USB 6008 [24].....	39
Ilustración 22. Configuración de los pines de amplificador AD623AN [25].....	40
Ilustración 23. Amplificador Instrumental AD623AN [25].....	40
Ilustración 24. Esquema del circuito diseñado en Proteus 8 para aplicación de voltaje en una celda de electrólisis microbiana y para la medición de la corriente consumida. ....	41
Ilustración 25. Diseño de la PCB en Proteus 8 Professional. ....	43
Ilustración 26. Fotolito de la PCB diseñada. ....	43
Ilustración 27. Renderizado de la PCB con los componentes ensamblados. ....	45
Ilustración 28. Renderizado de la PCB previo al ensamblado de componentes.....	45
Ilustración 29. PCB fabricada con los componentes soldados (capa inferior). ....	45

Ilustración 30. PCB fabricada con los componentes soldados (capa superior). .....	45
Ilustración 31. Panel Frontal en LabVIEW. (1) Ventana del panel frontal (2) Barra de herramientas (3) Paleta de funciones [28].....	47
Ilustración 32. Diagrama de bloques de LabVIEW. (1) Terminales de indicador (2) Cables (3) Nodos (4) Terminales de control [28].....	48
Ilustración 33. Diagrama de flujo del programa desarrollado para el proyecto. ....	49
Ilustración 34. Panel frontal de la pantalla de Inicio.....	50
Ilustración 35. SubVI que permite el cambio entre programas .....	51
Ilustración 36. Icono del SubVI que permite la apertura de VI a partir de otros.....	51
Ilustración 37. Diagrama de bloques de la pantalla de Inicio.....	52
Ilustración 38. Panel frontal de la pantalla de selección de la forma de onda. ....	53
Ilustración 39. Sección del diagrama de bloques de la pantalla de selección de la forma de onda.....	54
Ilustración 40. Configuración de parámetros de la onda cuadrada.....	56
Ilustración 41. Configuración de parámetros de la onda cíclica.....	56
Ilustración 42. Configuración de parámetros de la onda escalón. ....	56
Ilustración 43. Configuración de parámetros de la onda rampa. ....	56
Ilustración 44. Configuración de parámetros de la onda de pulso diferencial.....	57
Ilustración 45. Panel frontal Pulso Diferencial. ....	58
Ilustración 46. Sección del diagrama de bloques de la forma de onda Pulso Diferencial .....	59
Ilustración 47. Sección del programa donde se realiza registro de datos y de parámetros del experimento. ....	60
Ilustración 48. Sección del programa que calcula el tiempo de duración de la onda en hh:mm:ss .....	61
Ilustración 49. Sección del programa en la que se envían referencias del programa principal al subVI encargado de la generación de la forma de onda. ....	62
Ilustración 50. Sección del programa destinada a ingresar el tiempo en que se tomaron muestras del cultivo de fermentación, así como la concentración medida en cada caso. ....	63
Ilustración 51. Sección del diagrama de bloques de la forma de onda Rampa para la exportación a Excel de los datos del experimento.....	64
Ilustración 52. Denominación de las hojas exportadas a Excel en cada experimento realizado.....	65
Ilustración 53. Sección del subVI que genera la forma de onda de tipo Escalón. ....	66
Ilustración 54. Gráfica Onda Escalón .....	67
Ilustración 55. DAQ Assistant para suministrar el voltaje generado. ....	68
Ilustración 56. DAQ Assistant para realizar la lectura de los valores de intensidad. 68	
Ilustración 57. Configuración de parámetros bloque DAQ Assistant Voltaje aplicado. ....	69
Ilustración 58. Configuración de parámetros bloque DAQ Assistant Lectura de Corriente.....	70
Ilustración 59. Sección del subVI que genera la forma de onda de tipo Rampa.....	71
Ilustración 60. Gráfica Onda Rampa .....	72
Ilustración 61. Sección del subVI que genera la forma de onda de tipo Cíclica. ....	73

Ilustración 62. Gráfica Onda Cíclica. ....	74
Ilustración 63. VI que calcula el tiempo total de ejecución de la forma de onda Cíclica. .....	76
Ilustración 64. Sección del subVI que genera la forma de onda Cuadrada. ....	77
Ilustración 65. Gráfica Onda Cuadrada .....	78
Ilustración 66. VI que calcula el tiempo de ejecución de la forma de onda Cuadrada. .....	79
Ilustración 67. Sección del subVI que genera la forma de onda de Pulso Diferencial. .....	80
Ilustración 68. Gráfica Onda Pulso Diferencial. ....	81
Ilustración 69. VI que calcula el de ejecución de la forma de onda de Pulso Diferencial .....	82
Ilustración 70. Reactor con sistema de agitación empleado durante los experimentos. .....	84
Ilustración 71. Electrodo de grafito usado en el cátodo durante los ensayos de electrofermentación [30]. ....	84
Ilustración 72. Electrodo de platino usado en el ánodo durante los ensayos de electrofermentación [31]. ....	84
Ilustración 73. Fuente de tensión utilizada durante los ensayos preliminares. ....	85
Ilustración 74. Reactores en los sistemas de agitación durante los ensayos. ....	86
Ilustración 75. Gráfica con los resultados de consumo de glucosa obtenidos durante los ensayos con la fuente de tensión. ....	86
Ilustración 76. Gráfica con los resultados de concentración de etanol obtenidos durante los ensayos con la fuente de tensión. ....	87
Ilustración 77. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con un escalón de 2V .....	89
Ilustración 78. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con una rampa de 0 a 2 V durante 6 horas y 2V mantenidos hasta 24 horas .....	90
Ilustración 79. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con un ciclo de 0 a 2 V con 0.01 V/s y 200 ciclos. ....	90
Ilustración 80. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con una rampa de 0 a 2 V durante 10 horas y 2V mantenidos hasta 24 horas .....	90
Ilustración 81. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con un pulso diferencial de 0 a 3 V, con pulso de amplitud 0,5 V, incremento 0,02 V, ancho de pulso 60 segundos, periodo 160 segundos y voltaje y tiempo final de 2V y 24 horas .....	91
Ilustración 82. Gráfica con los resultados de consumo de glucosa obtenidos durante los ensayos con el sistema desarrollado. ....	91
Ilustración 83. Gráfica con los resultados de la producción de etanol obtenidos durante los con el sistema desarrollado. ....	92
Ilustración 84. Gráfico que muestra la clasificación del número total de horas dedicadas al proyecto por actividad .....	95
Ilustración 85. Gráfico del porcentaje que representan cada uno de los costes asociados al proyecto. ....	98
Ilustración 86. Corriente medida en el reactor excitado con 2V durante 24 horas..	111

Ilustración 87. Corriente medida en el reactor excitado con una rampa de 0 a 2V durante 6 horas y 2V mantenido hasta 24 horas .....	111
Ilustración 88. Corriente medida en el reactor excitado con una rampa de 0 a 2V durante 10 horas y 2V mantenido hasta 24 horas .....	112
Ilustración 89. Corriente medida en el reactor excitado con un ciclo de 0 a 2 V con 0.01 V/s y 200 ciclos.....	112
Ilustración 90. Corriente medida en el reactor excitado con pulso diferencial de 0 a 3 V, con pulso de amplitud 0,5V, incremento de 0,02, ancho de pulso 60 segundos, periodo 160 segundos y voltaje y tiempo final de 2V y 24 horas: .....	113
Ilustración 91. Manual de usuario: Terminal IN+ de la PCB, donde se conecta el electrodo que actuará de cátodo. ....	114
Ilustración 92. Manual de usuario: Panel frontal de la pantalla de Inicio. ....	114
Ilustración 93. Manual de usuario: Panel frontal menú selección de forma de onda. ....	115
Ilustración 94. Manual de usuario: Panel Frontal forma de onda Rampa. ....	116
Ilustración 95. Manual de usuario: Sección del Panel Frontal donde se configura el experimento.....	117
Ilustración 96. Manual de usuario: Ejemplo de almacenamiento de datos. ....	117
Ilustración 97. Manual de usuario: Ejemplo de registro de la información relativa a los electrodos empleados. ....	118
Ilustración 98. Manual de usuario: Ejemplo de configuración de la forma de onda Rampa.....	119
Ilustración 99. Manual de usuario: Ejemplo de información adicional de la configuración del experimento.....	120
Ilustración 100. Manual de usuario: Botón para comenzar el experimento. ....	120
Ilustración 101. Manual de usuario: Sección de programa en la que se muestra la evolución del experimento.....	121
Ilustración 102. Manual de usuario: Botón "Finalizar experimento".....	122
Ilustración 103. Manual de usuario: Ejemplo de visualización de los parámetros de configuración del experimento en el archivo Excel.....	122
Ilustración 104. Manual de usuario: Ejemplo de visualización de los voltajes aplicados e intensidades leídas en el archivo Excel.....	122
Ilustración 105. Manual de usuario: Ejemplo de visualización de las concentraciones medidas en el archivo Excel.....	123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación y tipos de biorreactores de cámara única .....	14
Tabla 2. Clasificación y tipos de biorreactores de doble cámara.....	15
Tabla 3. Características de materiales básicos de electrodos [7].....	18
Tabla 4. Instrumentación Convencional vs Instrumentación Virtual .....	31
Tabla 5. Rendimiento Etanol obtenido durante las pruebas preliminares.....	87
Tabla 6. Rendimiento Etanol obtenido durante los ensayos realizados con el sistema desarrollado.....	92
Tabla 7. Clasificación del número total de horas dedicadas al proyecto por actividad. ....	94
Tabla 8. Tablas salariales 2024 según el nivel salarial [33].....	96
Tabla 9. Costes de los materiales empleados en el proyecto.....	96
Tabla 10. Costes totales del proyecto. ....	98
Tabla 11. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación conectado a 10V. ....	106
Tabla 12. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación sin conexión a una fuente de tensión. ....	106
Tabla 13. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación conectado a 2V. ....	107
Tabla 14. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación conectado a 4V. ....	107
Tabla 15. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación conectado a 6V. ....	108
Tabla 16. Resultados de las muestras del reactor excitado con 2V durante 24 horas .....	108
Tabla 17. Resultados de las muestras del reactor excitado con una rampa de 0 a 2V durante 6 horas y 2V mantenido hasta 24 horas .....	109
Tabla 18. Resultados de las muestras del reactor excitado con una rampa de 0 a 2V durante 10 horas y 2V mantenido hasta 24 horas .....	109
Tabla 19. Resultados de las muestras del reactor excitado con un ciclo de 0 a 2V con 0.01V/s y 200 ciclos.....	110
Tabla 20. Resultados de las muestras del reactor excitado con pulso diferencial de 0 a 3 V, con pulso de amplitud 0,5V, incremento de pulso 0,02, ancho de pulso 60 segundos, periodo 160 segundos y voltaje y tiempo final de 2V y 24 horas .....	110





# 1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una introducción al Trabajo de Fin de Máster. Primero, se realiza una breve descripción del proyecto, luego se plantean los objetivos y, finalmente, se describe cómo se ha estructurado la memoria presentada.

## 1.1 Introducción al proyecto

El proyecto de fin de máster se denomina “Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación”, y se ha desarrollado en colaboración con el Departamento de Tecnología Electrónica y el Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid para obtener el título de Máster en Ingeniería Industrial.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema de control electroquímico capaz de aplicar de forma controlada diversas formas de onda de voltaje sobre una celda electroquímica, con el propósito de regular las condiciones electroquímicas de un proceso fermentativo. Esta técnica ha surgido como una posible alternativa para optimizar las rutas metabólicas y, potencialmente, mejorar la eficiencia del proceso.

Para la implementación de este sistema, se ha realizado un estudio preliminar sobre el funcionamiento de las celdas electroquímicas y los sistemas de electrofermentación. Este análisis comprende una revisión de los métodos de estudio electroquímico, conocidos como técnicas voltamétricas. Aunque el propósito principal del sistema no es el uso directo de estas técnicas, se emplearán como referencia para el diseño de las formas de onda. Asimismo, se ha llevado a cabo la identificación de la instrumentación electrónica requerida para su ejecución. Posteriormente, se ha desarrollado una interfaz de usuario mediante el entorno de programación gráfica LabVIEW, la cual permitirá al usuario seleccionar y configurar la forma de onda que se aplicará a la celda.

Si bien la motivación inicial del proyecto se orientaba hacia la optimización del proceso de obtención de 2,3-butanodiol a partir de la fermentación de la celulosa contenida en residuos de frutas y verduras, este proceso aún no se encuentra completamente desarrollado. En consecuencia, para la validación del sistema propuesto, se empleará la fermentación de etanol, un proceso ya dominado.



El 2,3-butanodiol es un compuesto de gran interés industrial, con aplicaciones relevantes en la producción de combustibles, plásticos y productos farmacéuticos. De manera análoga, el etanol se utiliza principalmente como disolvente en la industria química, en la fabricación de productos farmacéuticos y cosméticos, así como en la producción de bebidas alcohólicas. Además, se emplea como fuente de energía renovable en su forma de biocombustible.

En ambos casos, la producción convencional de estos compuestos se lleva a cabo a partir de derivados petroquímicos, lo que conlleva un proceso de alta demanda energética y un considerable impacto ambiental. No obstante, este escenario ha impulsado la investigación de métodos alternativos más sostenibles, como la fermentación microbiana asistida por corriente eléctrica.

### 1.2 Objetivos

El objetivo general de este proyecto es desarrollar un sistema para la experimentación de electrofermentaciones en un reactor, ofreciendo una alternativa de menor costo y mayor flexibilidad en comparación con una fuente de tensión convencional.

Para alcanzar este objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos

- ✓ Seleccionar la configuración de celda electroquímica más adecuada para esta aplicación. Esto incluye estudiar y evaluar los materiales más idóneos para los electrodos de las celdas, considerando sus propiedades y compatibilidad con el sistema.
- ✓ Diseñar un sistema electrónico que permita aplicar diferentes formas de onda a los electrodos utilizando el software LabVIEW. Este sistema deberá garantizar el control del voltaje aplicado, respetando los valores máximos y mínimos establecidos para el proceso, y permitir la medición de la corriente consumida en el circuito.
- ✓ Validar experimentalmente el sistema diseñado para garantizar su fiabilidad como herramienta. Para ello se llevarán a cabo pruebas experimentales con el fin de evaluar el desempeño del sistema, asegurando que cumple con los requisitos necesarios para el estudio de procesos de electrofermentación y que puede ser considerado una herramienta confiable en este ámbito.



### 1.3 Descripción de la memoria

A continuación, se presenta la organización de la memoria, proporcionando una visión general del contenido abordado en cada uno de sus capítulos.

En este primer capítulo se ha presentado una breve introducción, junto con la exposición de los objetivos que se buscan alcanzar con el desarrollo del proyecto.

En el segundo capítulo de esta memoria se explican los fundamentos teóricos necesarios para comprender el proceso de electrofermentación. Se describe el proceso de fermentación, los biorreactores y el principio de funcionamiento de la electrofermentación. Se abordan también los electrodos empleados en estos sistemas y se presentan antecedentes de investigaciones previas. Además, se incluyen las técnicas voltamétricas usadas como base para diseñar las formas de onda con las que el sistema desarrollado puede excitar los electrodos.

En el tercer capítulo se recoge el diseño y desarrollo del hardware del sistema experimental. Se explican los componentes de la instrumentación electrónica y la elección de la tarjeta de adquisición, así como el proceso de construcción del sistema de experimentación. Además, se detalla el diseño del circuito de medición de corriente y la PCB asociada.

El cuarto capítulo describe el desarrollo del software. Primero, se explica la estructura del programa desarrollado en LabVIEW, incluyendo los diagramas de flujo y la interfaz de usuario. Luego, se detallan las funcionalidades del software, como la configuración que debe realizar el usuario antes de comenzar el experimento, así como la visualización y el registro de los resultados. Finalmente, se aborda la generación de las distintas formas de onda implementadas.

El quinto capítulo presenta los experimentos realizados para validar el sistema propuesto. Se describen los materiales utilizados, los ensayos preliminares realizados con una fuente de tensión convencional y los experimentos llevados a cabo con el sistema desarrollado. Finalmente, se realiza un análisis de los resultados obtenidos y su evaluación en comparación con los objetivos planteados.

En el sexto capítulo se realiza un análisis económico del proyecto, evaluando el tiempo invertido y los costes asociados al desarrollo del sistema. Se detallan los costes de personal y materiales, así como los costes indirectos. Finalmente, se calcula el coste total de la implementación del proyecto.



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN



*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*

El séptimo capítulo presenta las principales conclusiones del proyecto, junto con la contribución del sistema desarrollado al campo de la electrofermentación. Asimismo, se proponen posibles líneas de investigación y desarrollo futuro que podrían ampliar y mejorar el uso de la electrofermentación en distintos procesos biotecnológicos.

El octavo capítulo recopila las referencias bibliográficas utilizadas en la elaboración de este documento.

Por último, el noveno capítulo incluye los anexos del proyecto, que contienen la recopilación completa de los datos obtenidos durante los ensayos, así como el manual de usuario del sistema desarrollado.

# 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se exponen los fundamentos teóricos del equipo desarrollado, sustentados en principios bioelectroquímicos.

Un sistema bioelectroquímico consta de una celda bioelectroquímica integrada con un sistema de instrumentación electrónica, que permite aplicar y medir las corrientes y tensiones necesarias para realizar los análisis bioelectroquímicos.

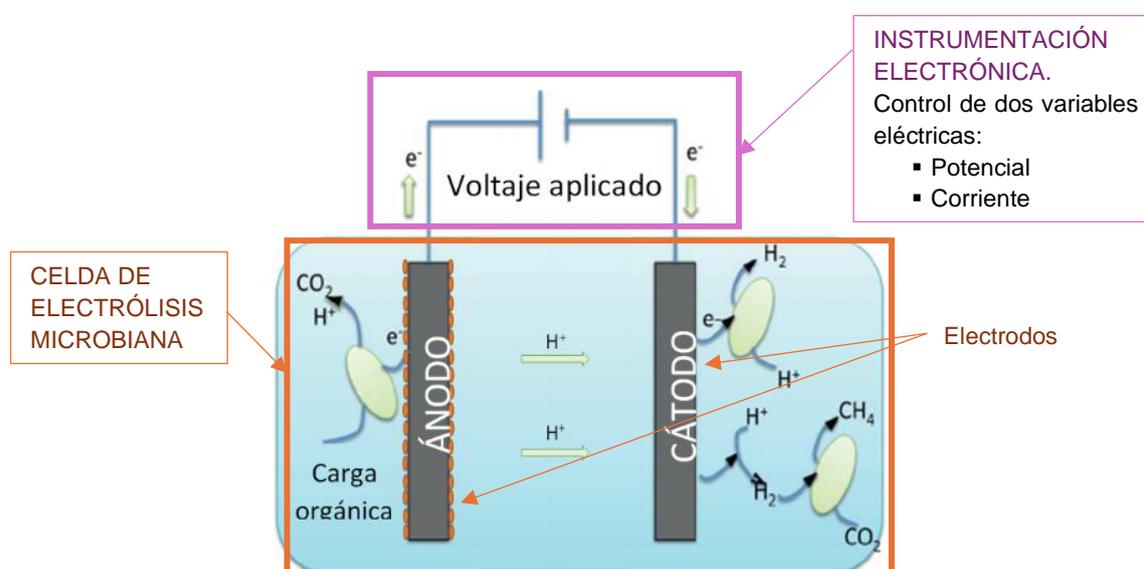


Ilustración 1. Esquema de un sistema bioelectroquímico [1]

Como se muestra en la ilustración 1, la celda de electrólisis microbiana básica está compuesta por dos electrodos y una solución electrolítica, aunque se pueden añadir más electrodos para funciones concretas. Los electrodos están fabricados con materiales metálicos o semiconductores que permiten el flujo de electrones. Mientras que la solución electrolítica, actúa como un medio químico que permite la conducción iónica de la corriente.

Dentro de la celda, se producirán diversas reacciones en función de las variables eléctricas aplicadas y de las propiedades de los componentes utilizados. La reacción más relevante ocurre en la superficie de uno de los electrodos, conocido como el electrodo de trabajo.



### 2.1 Proceso de Fermentación y Biorreactores

La fermentación ha sido una técnica fundamental para preservar alimentos a lo largo de la historia. Sin embargo, no fue hasta la década de 1850 que científicos como Louis Pasteur identificaron a los microorganismos como los responsables de este proceso. A partir de ese momento, se descubrió que la fermentación implica la descomposición de azúcares y almidones por parte de estos microorganismos para obtener energía. Los subproductos generados, como el ácido láctico, el etanol y el ácido acético, son fundamentales en nuestra alimentación, estando presentes en productos como el yogur o el vino [2].

Las tecnologías contemporáneas han ampliado el uso de la fermentación, permitiendo la obtención de biocombustibles, biofármacos y productos químicos especializados. Además, la fermentación desempeña un papel clave en la extensión de la vida útil de los productos, mejorando su estabilidad y modificando sus propiedades.

El proceso de fermentación se lleva a cabo en dispositivos llamados biorreactores, comúnmente conocidos como “fermentadores”. El diseño de estos equipos debe garantizar la homogeneidad de los componentes y proporcionar un entorno controlado para la transformación de sustancias orgánicas mediante microorganismos o sistemas de enzimas [3]. Generalmente, los biorreactores son recipientes cilíndricos en los que se desarrolla un proceso bioquímico que involucra organismos vivos. Este proceso puede ser aeróbico, en presencia de oxígeno, o anaeróbico, en su ausencia.

El objetivo principal de un biorreactor es mantener condiciones ambientales específicas, que favorezcan el crecimiento de los organismos para la producción de sustancias químicas específicas. Estas condiciones incluyen parámetros como el pH, la temperatura y la concentración de oxígeno, entre otros.

El desarrollo de la fermentación en el biorreactor coincide con el ciclo de crecimiento de una población microbiana [4]. Esta incluye varias fases diferenciadas:

- **Fase de latencia:** Al inocular un cultivo microbiano en un nuevo medio el crecimiento no inicia de inmediato, sino que primero ocurre un período de adaptación conocido como fase de latencia. La duración de esta fase depende tanto de las condiciones del medio como del estado del inóculo. Si las células provienen de un cultivo en fase exponencial y se transfieren

a un medio con características similares, la fase de latencia puede ser muy breve. En cambio, si el inóculo está envejecido o presenta algún daño, la fase de latencia será considerablemente más prolongada.

- **Fase exponencial:** Durante esta fase, las células se duplican a intervalos regulares, dependiendo de los recursos disponibles y las condiciones ambientales. Las células en esta fase están en su mejor estado de salud y son ideales para estudios enzimáticos y de componentes celulares. La velocidad de crecimiento varía según las condiciones ambientales y las características genéticas del organismo.
- **Fase estacionaria:** El crecimiento exponencial no puede mantenerse indefinidamente en un cultivo cerrado debido al agotamiento de nutrientes y a la acumulación de desechos. Cuando esto ocurre, la población entra en la fase estacionaria, donde no hay un aumento neto en el número de células. Aunque el crecimiento se detiene, los procesos metabólicos y biosintéticos siguen activos, aunque a una velocidad disminuida.
- **Fase de muerte:** Finalmente, la población entra en la fase de muerte, donde el número de células viables disminuye exponencialmente. Esta fase es más lenta que la fase exponencial y puede durar meses o incluso años.

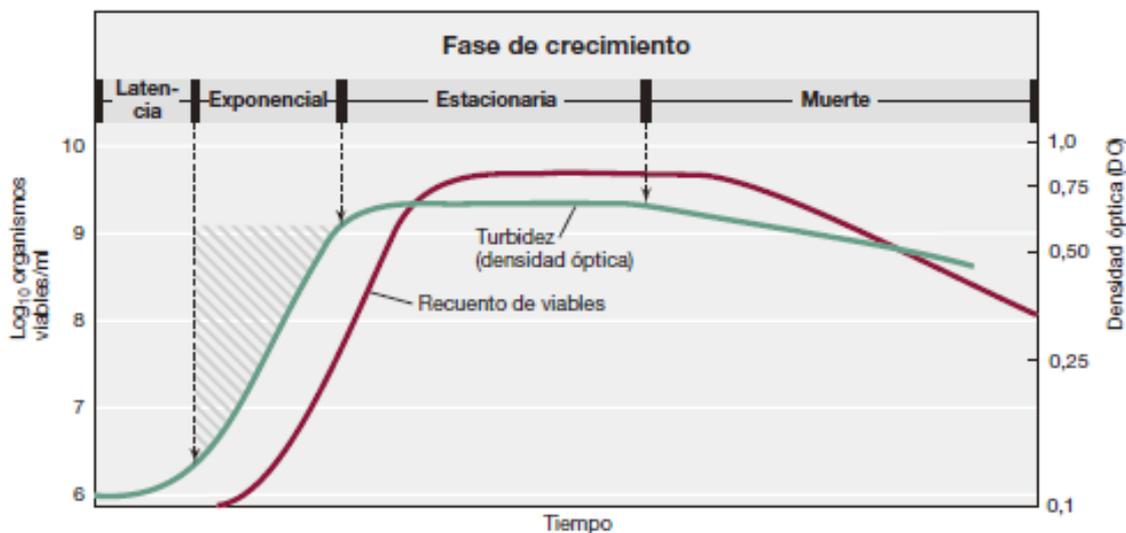


Ilustración 2. Curva de crecimiento típica de una población bacteriana [4]

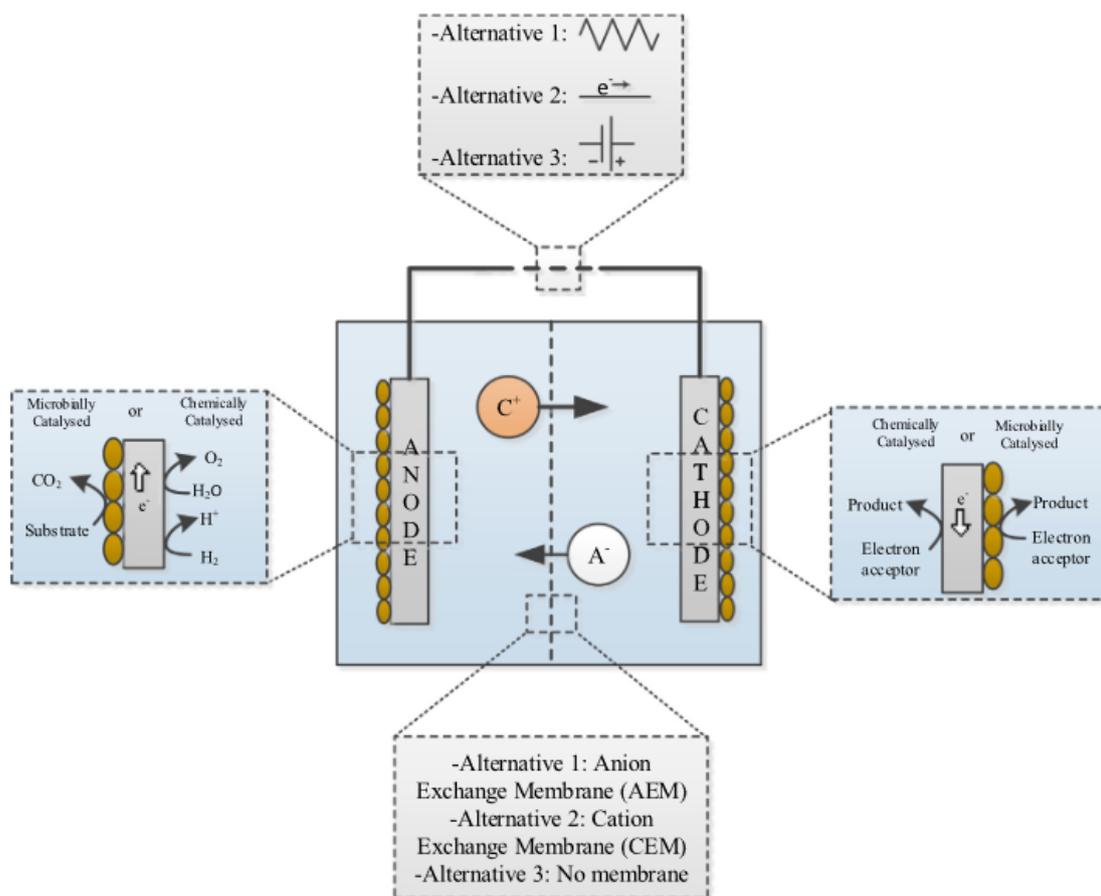


Para concluir con esta introducción genérica acerca de la fermentación cabe señalar que se distinguen tres modos de operación [5]:

- **Fermentación por Lotes (Batch):** se caracteriza por la ausencia de flujo de entrada de reactivos y de salida de productos durante el proceso. En este método, se carga una cantidad fija de sustrato en el reactor y se deja reaccionar durante un tiempo determinado. Es común en industrias pequeñas y para procesos a pequeña escala. Es el modo de operación que se ha utilizado durante los ensayos.
- **Fermentación por Lotes Alimentados (Fed-Batch):** el reactor se alimenta en cargas sucesivas y el producto no se retira hasta finalizar el proceso. El volumen del medio de reacción varía conforme avanza el proceso. Este método permite mantener la velocidad de reacción constante manipulando la velocidad de adición de reactivos, incrementando la productividad significativamente.
- **Fermentación Continua (Continuos):** se distingue por tener un flujo continuo de entrada de sustratos y salida de productos, manteniendo el volumen de líquido constante en el reactor. Este tipo de fermentación es utilizado para tratar grandes volúmenes de agua residual y en la producción de proteínas, etanol y ácido láctico. En este tipo de biorreactores son fundamentales los dispositivos para el control del pH, temperatura y concentración de oxígeno disuelto.

## 2.2 Principio de funcionamiento de la electrofermentación

Un sistema bioelectroquímico (BES) típico está compuesto por celdas de ánodo y cátodo, separadas en ocasiones por una membrana, y conectadas a través de una fuente de tensión [6]. Existen diversas alternativas para cada elemento que constituye el BES, lo que permite desarrollar una amplia gama de celdas de electrólisis microbiana como se muestra ilustración 3.



*Ilustración 3. Resumen de las posibles configuraciones de los sistemas bioelectroquímicos [6]*

Los electrodos ubicados en las celdas están inmersos en soluciones electrolíticas, que suelen ser soluciones acuosas o aguas residuales y contienen los reactivos y/o productos. Estas soluciones electrolíticas pueden facilitar el transporte de iones entre las celdas a través de la membrana, en caso de que esta esté presente. Al mismo tiempo, un circuito eléctrico entre los electrodos permite el flujo de electrones.

Los sistemas bioelectroquímicos pueden operar tanto como celdas de combustible microbiano (MFC) como celdas de electrólisis microbiana (MEC). La diferencia en su funcionamiento radica en el cambio de energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) de la reacción global. Como se muestra en la ilustración 4, los procesos catabólicos y anabólicos dentro de estos sistemas están directamente relacionados con el flujo de electrones y la disponibilidad de reactivos, lo que influye en el balance energético

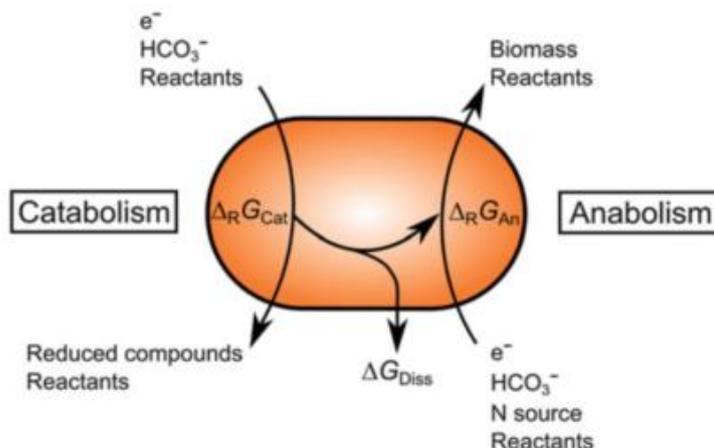


Ilustración 4. División conceptual de las reacciones catabólicas y anabólicas para calcular una reacción de crecimiento general [7]

Cuando el BES opera como MFC, el ánodo y el cátodo están conectados mediante un resistor, generando energía con un valor de  $\Delta G$  positivo. En cambio, en modo MEC, se añade energía al sistema, aplicando un voltaje para acelerar las reacciones y/o impulsar reacciones que no son termodinámicamente favorables, resultando en un  $\Delta G$  negativo [6].

La integración de sistemas bioelectroquímicos con procesos de fermentación representa una innovación que plantea la optimización de la eficiencia del proceso y de la recuperación de productos. Esta técnica, conocida como electrofermentación, se basa en la regulación electroquímica del metabolismo fermentativo microbiano.

Dado que el proceso de fermentación incluye múltiples etapas, enfrenta diversas limitaciones que restringen su eficiencia global. Una de las principales dificultades es el desequilibrio redox, que provoca una disminución tanto en la cantidad como en la calidad del producto final. Los factores que generan este desequilibrio redox pueden mitigarse mediante la incorporación de electrodos, lo que implica el enriquecimiento de microorganismos exoelectrogénicos en el proceso de fermentación.

En este sistema, los electrodos funcionan como donantes de electrones no solubles (en el caso del cátodo) o como aceptores (en el caso del ánodo), sin interferir negativamente en la reacción de fermentación. Los productos de fermentación más reducidos que el sustrato utilizan los electrones proporcionados por el cátodo, en un proceso denominado electrofermentación catódica. En ella, la generación de corriente eléctrica deja de ser un objetivo y se convierte en la



## CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



fuerza principal de energía para el proceso de fermentación. En cambio, cuando los productos de fermentación están más oxidados que el sustrato, se realiza un proceso de electrofermentación anódica, en el cual el ánodo acepta los electrones generados por las reacciones oxidativas.

La eficiencia de la electro-fermentación se representa matemáticamente como [8]:

$$\eta_{EF} = \frac{Q_e}{Q_{producto}} \quad (1)$$

Donde  $\eta_{EF}$  es la eficiencia de la electrofermentación,  $Q_e$  es la carga transferida a través de la corriente eléctrica, es decir, la integral de la corriente eléctrica durante el tiempo total del proceso. La carga total de producto es  $Q_{producto}$  y se pueden calcular de la siguiente manera:

$$N_{C_w N_x O_y H_z} = 4w - 3x - 2y + z \quad (2)$$

$$Q_{producto} = n_{producto} \cdot N_{producto} \cdot F \quad (3)$$

Siendo  $F$  es la constante de Faraday (96,485 C/mol).

La eficiencia de la electrofermentación describe el consumo o generación de electricidad en relación con la producción una molécula determinada. Un rendimiento superior a 1 indica que la electrofermentación anódica está próxima a la producción de electricidad o bien que la electrofermentación catódica se aproxima a la electrosíntesis. En cambio, si el valor se encuentra entre 0 y 1, el número de electrones recuperados en el producto serán superiores a los proporcionados en el caso de la electrofermentación anódica o bien superiores a los consumidos en el caso de la electrofermentación catódica. De este modo,  $\eta_{EF}$  puede ser una herramienta útil para evaluar el rendimiento global del proceso de electrofermentación.

Es necesario investigar la vía fermentativa que se lleva a cabo para producir los productos objetivo, con el fin de determinar si ésta será anódica o catódica. En la ilustración 5, se muestra un esquema del proceso de electrofermentación anódica y catódica en un biorreactor.

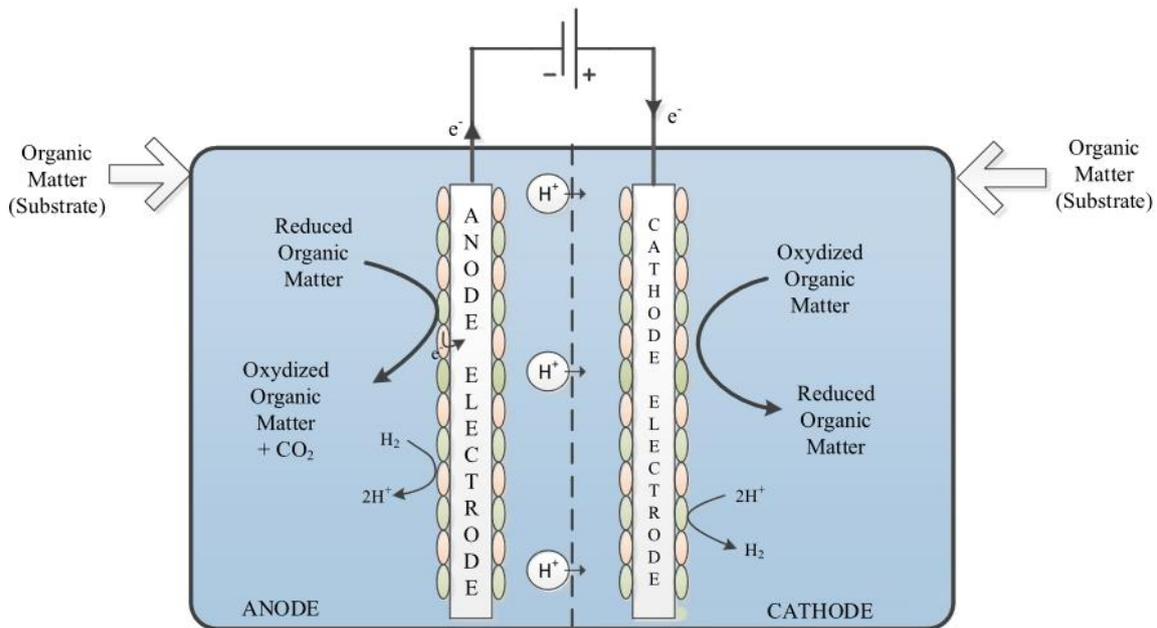


Ilustración 5. Mecanismo de fermentación anódica y catódica [6]

En el compartimento del ánodo, el compuesto orgánico se oxida al ceder electrones. En la fermentación convencional, la falta de un aceptor de electrones puede reducir la tasa de reacción y llevar a la formación de productos secundarios no deseados. Sin embargo, en una célula de electrofermentación anódica, el electrón liberado por el compuesto orgánico oxidado es capturado por el electrodo del ánodo. Esta captura de electrones permite que la fermentación siga la vía deseada, mejorando así la selectividad del proceso.

En cambio, si el objetivo es reducir la materia orgánica, el proceso de electrofermentación ocurre en el compartimento catódico. En este caso, los microorganismos emplean el electrodo del cátodo como donante de electrones, mientras que los sustratos en el medio actúan como aceptores de electrones. La adición de un agente reductor al medio catódico asegura que la fermentación avance en la dirección buscada. Además, los electrones generados durante la oxidación en el ánodo pueden transferirse al cátodo, donde se emplean en las reacciones de reducción, lo cual optimiza el flujo de electrones en el sistema.

En este proyecto, se implementará un sistema de electrofermentación catódica, ya que se busca obtener un producto final más reducido que el sustrato original.



### 2.3 Diseño de sistemas de electrofermentación

Al caracterizar los procesos de bioproducción industrial, es esencial tener en cuenta parámetros clave como rendimientos y tasas de conversión [7]. Por este motivo los sistemas bioelectroquímicos deben permitir el estudio y la optimización de estos parámetros. Además de los sustratos comunes como carbono y nitrógeno, los electrones son reactivos fundamentales en estos procesos.

La transferencia de electrones puede realizarse a través de varios mecanismos, pero siempre depende de un electrodo en contacto con el líquido del reactor, lo cual crea el carácter híbrido de los sistemas bioelectroquímicos. Estos sistemas deben combinar las necesidades de los biorreactores convencionales con las cualidades de un reactor electroquímico, es decir, es muy importante que estos reactores cumplan con las demandas microbianas y electroquímicas al mismo tiempo, lo que significa que siempre habrá un compromiso. Cabe mencionar que actualmente no existen reactores comerciales ni un estándar universal para sistemas bioelectroquímicos, por lo que en los proyectos realizados sobre este tema es frecuente el empleo de diversos materiales y geometrías para su construcción. Hasta ahora, estos reactores suelen utilizarse en estudios específicos y en entornos de laboratorio. Como resultado, las comparaciones entre estudios y reactores son limitadas.

Una clasificación básica en el diseño de biorreactores se basa en el número de cámaras, distinguiéndose principalmente entre sistemas de cámara única y sistemas de doble cámara, separadas por una membrana. Aunque las membranas son esenciales para evitar intercambios químicos no deseados y previenen la difusión de productos entre las cámaras, pueden limitar el rendimiento debido a su resistencia. Para superar este desafío, se han desarrollado reactores de cámara única. Especialmente en términos de escalado, los sistemas de cámara única pueden ser la mejor opción, ya que las membranas suelen ser propensas a la bioincrustación y requieren mantenimiento constante, lo que resulta muy costoso.

Los sistemas de cámara única contienen solo una solución electrolítica, mientras que, en los sistemas de dos cámaras, la solución electrolítica se divide en un catolito y un anolito. En las tablas 1 y 2 se presenta un resumen de los tipos de diseños posibles según la clasificación anterior [7].

*Tabla 1. Clasificación y tipos de biorreactores de cámara única*

<b>SISTEMAS DE CÁMARA ÚNICA</b>		
<b>Cubo de cámara única</b>	<p>Son sistemas simples y sin membrana, son fáciles de manejar y se usan frecuentemente en experimentos de escalado. La superficie del electrodo puede aumentarse fácilmente añadiendo más electrodos o utilizando estructuras tridimensionales. Este diseño alterna ánodos y cátodos con separadores para evitar cortocircuitos.</p>	
<b>Sistemas cilíndricos de cámara única</b>	<p>Utilizan un cilindro de acero como cátodo y un ánodo concéntrico dentro de este. Este diseño permite una distribución homogénea del potencial, pero la distancia entre el ánodo y el cátodo es mayor que en otros diseños, lo que puede ser una desventaja. Además, el material del cátodo no se puede cambiar fácilmente para futuras investigaciones.</p>	
<b>Botella de cámara única</b>	<p>Adecuados para investigaciones preliminares y de laboratorio a pequeña escala. Consisten en una pequeña botella con ambos electrodos y un aislante para evitar cortocircuitos. La colocación de los electrodos no está fija, lo que reduce la reproducibilidad, sin embargo, estos reactores son fáciles y baratos de fabricar. Se pueden usar para experimentos de cribado y se pueden operar con el cátodo sobre el ánodo.</p>	

*Tabla 2. Clasificación y tipos de biorreactores de doble cámara*

<b>SISTEMAS DE DOBLE CÁMARA</b>		
<b>H-cells</b>	<p>Son reactores de dos cámaras separadas por una membrana, son comúnmente usadas en estudios preliminares. Son fáciles de configurar y permiten el uso de varios materiales de electrodos, así como la introducción de agitadores magnéticos y entradas de gas. Tienen desventajas como alta resistencia interna y limitaciones para escalar.</p>	
<b>Reactores tubulares concéntricos</b>	<p>Consisten en una cámara de ánodo dentro de una cámara de cátodo más grande, separadas por un tubo de vidrio con una ventana de membrana. Estos reactores permiten una configuración más fácil y ocupan menos espacio.</p>	
<b>Reactores de placa plana con canales de flujo serpenteantes</b>	<p>Su diseño es más complicado que otros reactores, pero permite una mejor distribución del potencial y mayores rendimientos debido a la mayor superficie específica del electrodo y el tiempo de contacto mejorado entre el electrolito y los electrodos. Sin embargo, la recirculación del medio es intensiva en energía y la ampliación del sistema es limitada.</p>	

<p style="text-align: center;"><b>Reactores de apilamiento de diálisis inversa</b></p>	<p>Este diseño permite convertir la energía del gradiente de salinidad en energía eléctrica, eliminando la necesidad de una fuente de energía externa. Sin embargo, se necesita un estudio crítico para evaluar el consumo de energía adicional en la regeneración de las soluciones salinas y el transporte de líquidos</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Reactores de tanque agitado</b></p>	<p>Son biorreactores estándar, pero están equipados con electrodos, utilizados para comparar la bioelectrosíntesis con la biosíntesis convencional y facilitar su implementación en infraestructuras existentes.</p>	

La desviación de las condiciones ideales de un sistema bioelectroquímico se definen principalmente por el diseño del reactor, que afecta a estos tres aspectos principales:

- **Pérdidas óhmicas:** Se pueden reducir usando una buena recolección de corriente en los electrodos, un electrolito con alta conductividad y una distancia pequeña entre ánodo y cátodo. También es importante la resistencia iónica de la solución, que depende de la conductividad y la separación entre los electrodos.
- **Transferencia de masa:** Las reacciones ocurren en la superficie de los electrodos, por lo que es clave asegurar un flujo eficiente de reactivos hacia el electrodo y la eliminación de los productos de la reacción para evitar pérdidas de rendimiento.
- **Sobrepotenciales del electrodo:** Estos ocurren cuando los electrodos no tienen una actividad catalítica ideal. Una mayor relación superficie-volumen del electrodo puede mejorar las corrientes al aumentar la superficie activa para la reacción.



### 2.4 Electroodos en electrofermentación

Los electrodos son componentes esenciales en los sistemas bioelectroquímicos, ya que facilitan el intercambio de electrones entre un material de electrodo abiótico y el metabolismo de los microorganismos.

El requisito principal de cualquier electrodo es su conductividad eléctrica. Además, los electrodos deben ser químicamente estables en el entorno operativo, lo que incluye resistencia a la corrosión y a la degradación química. Otro aspecto importante es la biocompatibilidad del material del electrodo, estos materiales no deben ser tóxicos para los microorganismos ni inhibir su actividad metabólica.

La superficie del electrodo puede modificarse para mejorar la adhesión de los microorganismos y la transferencia de electrones, por ejemplo, mediante el recubrimiento con polímeros conductores. También es importante que sean operativamente estables y que puedan ser escalados y fabricados a bajo costo. En resumen, los electrodos ideales deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Conductividad eléctrica relativamente alta.
- Poseer alta estabilidad química.
- Ofrecer una gran área de superficie específica accesible.
- Alta resistencia mecánica.
- Asequibles económicamente.

Además, es importante diferenciar la aplicación del material del electrodo como ánodo o cátodo y su régimen operativo exacto, ya que ciertos materiales pueden ser inadecuados bajo determinadas condiciones operativas.

En la tabla 3 se presenta un resumen de los materiales típicamente utilizados en la fabricación de electrodos para biorreactores.



## CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS



*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*

Tabla 3. Características de materiales básicos de electrodos [7]

Material	Electrical conductivity	Corrosion/degradation resistance	Biofilm formation	Electron transfer	Mechanical stability	Remarks
<b>Carbon materials</b>						
Graphite	+	++	+	+	+/-	Hydrophobic surface may hinder biofilm attachment
Activated carbon	+/-	++	++	+	+/-	Hydrophilic surface favors biofilm formation
Graphene	+	++	+/-	++	?	Hydrophobic surface may hinder biofilm attachment
Carbon nanotubes (CNTs)	+	++	+/-	++	?	Hydrophobic surface may hinder biofilm attachment
<b>Metals</b>						
Stainless steel	++	+	+	+	++	Susceptible to corrosion
Copper	++	+/-	+/-	+	++	Susceptible to corrosion, toxic corrosion products
Titanium	++	+	?	-	++	Insulating oxide layer formed
Nickel	++	+	?	+	++	
<b>Conductive polymers</b>						
Polyaniline	+/-	-	++	+	-	Susceptible to degradation
PPy	+/-	-	++	+	-	Susceptible to degradation
<b>Conductive ceramics</b>						
Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	+	++	++	+	+/-	
Indium doped tin oxide (ITO)	+	++	+	+	+/-	Results not necessarily transferable to other materials

Rating scale: ++ = very good, + = good, +/- = reasonable, - = poor, -- = very poor, ? = questionable/unknown

Los materiales de carbono son ampliamente utilizados en electrodos microbianos debido a su alta conductividad, biocompatibilidad y bajo costo. Entre ellos, el grafito destaca por su excelente conductividad y versatilidad, ya que se emplea en formas como fieltros, fibras, papeles de carbono y láminas. El carbón activado, por su gran área superficial y la presencia de grupos funcionales, se utiliza en telas, fibras y gránulos. Además, los nanomateriales de carbono son comunes en recubrimientos, aunque su biocompatibilidad sigue siendo un tema de debate.

Además de los materiales de carbono, se emplean materiales derivados de la carbonización de diferentes precursores, como biochars a base de madera y espumas de carbono reticuladas.

En cuanto a los metales, el acero inoxidable es ampliamente utilizado por su alta densidad de corriente, aunque puede desarrollar óxidos semiconductores a altos potenciales. Otros como la plata, el níquel y el titanio también se emplean, aunque presentan riesgos de oxidación y corrosión que pueden limitar su uso. El cobre es atractivo por su elevada conductividad eléctrica y su capacidad para operar a densidades de corriente significativas; sin embargo, su aplicación en medios biológicos está restringida por la corrosión en determinados rangos de potencial. Por otro lado, el platino destaca como uno de los materiales más adecuados debido a su excelente conductividad y alta resistencia a la corrosión, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren precisión y compatibilidad biológica, aunque su elevado costo puede ser una limitación.



### 2.5 Antecedentes de estudios en electrofermentación

La electrofermentación ha emergido como una tecnología prometedora en el campo de la biotecnología, permitiendo la modificación de procesos fermentativos mediante la aplicación de campos eléctricos. Esta innovación abre nuevas posibilidades para optimizar la producción de compuestos bioquímicos de alto valor, como el etanol, butanol y otros metabolitos.

En este trabajo, tomaremos como referencia el experimento llevado a cabo por investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Sucre y del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Antioquia, quienes evaluaron el impacto de los campos eléctricos moderados en la fermentación de dos microorganismos productores de etanol: *Saccharomyces cerevisiae* y *Zymomonas mobilis* [9]. Este estudio ofrece una base para analizar los efectos de los campos eléctricos en procesos fermentativos y servirá como punto de partida para explorar mejoras en estos sistemas.

El propósito de este estudio respondía a la necesidad de soluciones sostenibles en el sector energético que ha llevado a una creciente atención hacia los biocombustibles como el etanol, cuyo papel en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es crucial. El etanol, utilizado en mezclas con gasolina, es un actor clave en la transición hacia una economía energética más limpia, representando hasta el 73% del uso de biocombustibles y proyectándose como el 55% de la producción total de biocombustibles para 2030.

Como hemos visto anteriormente, la electrofermentación consiste en generar un flujo de corriente a través de un circuito electroquímico que induce la modificación del potencial redox intracelular, promoviendo la biosíntesis de compuestos reducidos de alta energía en microorganismos.

Una tecnología ampliamente utilizada es la aplicación de campos eléctricos pulsados, que se ha demostrado eficaz en la eliminación de bacterias y levaduras para la conservación de alimentos. Normalmente, las intensidades de estos campos eléctricos varían entre 20 y 80 kV/cm, con voltajes que van de 11 a 60 kV. La duración de los pulsos eléctricos puede estar entre 1 y 300  $\mu$ s. Sin embargo, investigaciones realizadas con *S. cerevisiae* han revelado que este tipo de campo eléctrico provoca la desestabilización y perforación de la membrana celular. Esto se vuelve irreversible y altera las funciones de la membrana, llevando a la inactivación de las células microbianas.

Lo que se promueve en este estudio es crear campos eléctricos que interactúan con las membranas celulares y alteran la homeostasis microbiana, pero en lugar de generar corrientes letales, aplicar campos eléctricos moderados, aumentando la eficiencia de procesos clave, como el consumo de sustratos y la producción de etanol. Esta tecnología ya ha mostrado mejoras en los procesos de fermentación [10]. Es posible generar un campo eléctrico integrando electrodos aislados en la mezcla de fermentación, conectando uno al polo positivo y el otro al polo negativo de una fuente de energía. Esta disposición crea un campo energético que funciona como un condensador.

En su caso estudiaron estos procesos con dos microorganismos: *S. cerevisiae*, una levadura ampliamente utilizada en la industria de alimentos y bebidas, y *Z. mobilis*, una bacteria gramnegativa con alta eficiencia metabólica. Se estudiaron en medios de cultivo específicos, incubados a 30 °C y 150 rpm con pH ajustado. La Ilustración 6 muestra la configuración del dispositivo, el cual consiste en un matraz de vidrio de 250 ml equipado con electrodos: una barra de grafito y un cable de cobre aislado enrollado

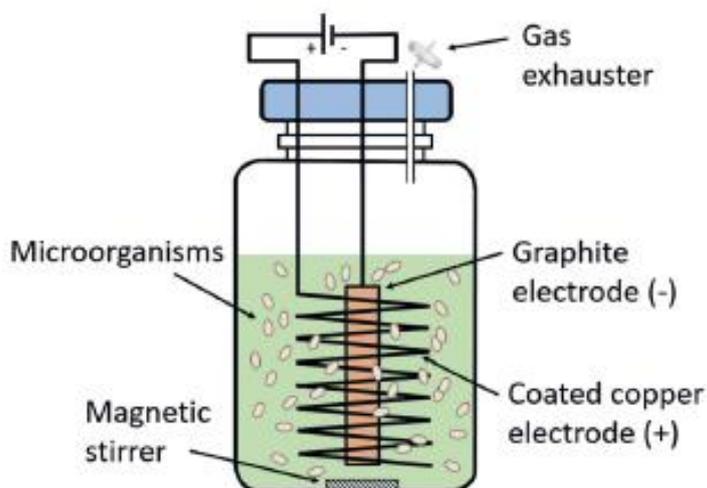


Ilustración 6. Configuración del dispositivo de campo eléctrico microbiano. [10]

Durante las pruebas que realizaron, se aplicaron voltajes de 0, 6, 12 y 18 V. Las muestras se analizaron periódicamente para medir glucosa, biomasa y etanol, usando métodos como espectrofotometría, cromatografía de gases y HPLC.

Ambos microorganismos mostraron respuestas diferenciadas ante los campos eléctricos, como se observa en las ilustraciones 7 y 8. Los estudios experimentales han revelado que:

- Los voltajes bajos (6-12 V) no afectan significativamente la tasa de crecimiento celular en ninguna de las cepas.
- Voltajes altos (18 V) aumentan significativamente el consumo de glucosa y la producción de etanol en ambas especies.
- Z. mobilis* muestra mayor sensibilidad a los campos eléctricos moderados, con incrementos notables en la producción de etanol incluso a voltajes bajos, mientras que *S. cerevisiae* requiere voltajes más altos para obtener efectos similares.

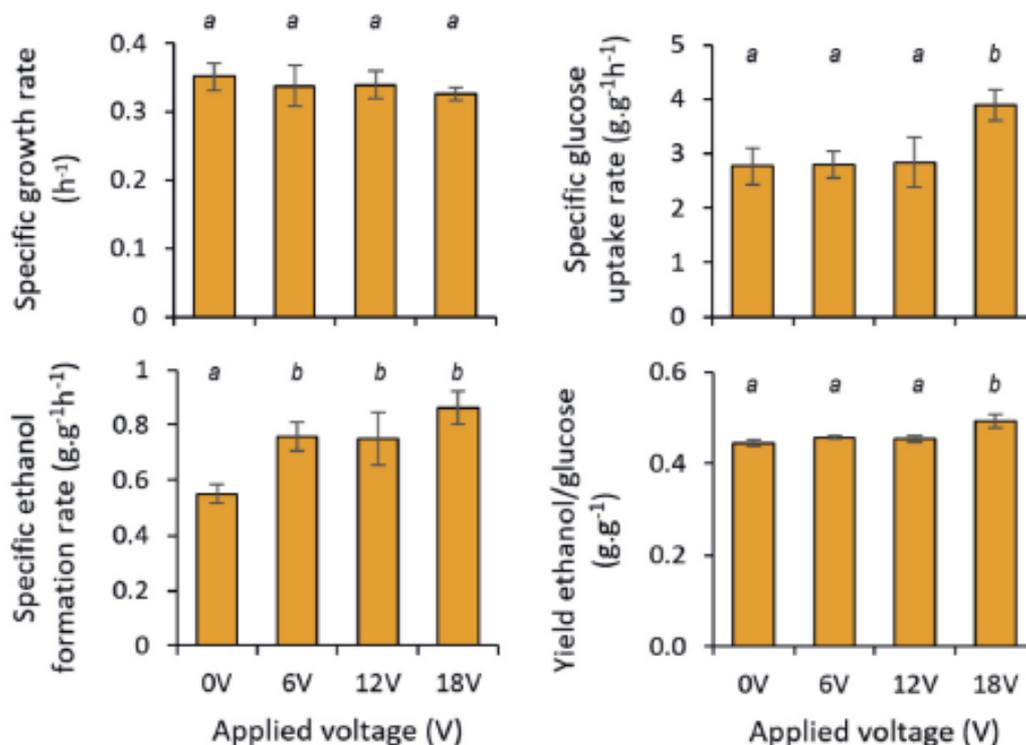


Ilustración 7. Parámetros cinéticos experimentales para las fermentaciones de *S. cerevisiae* a diferentes voltajes aplicados. Letras diferentes indican significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Los resultados se reportan como la media  $\pm$  desviación estándar ( $n = 3$ ). [9]

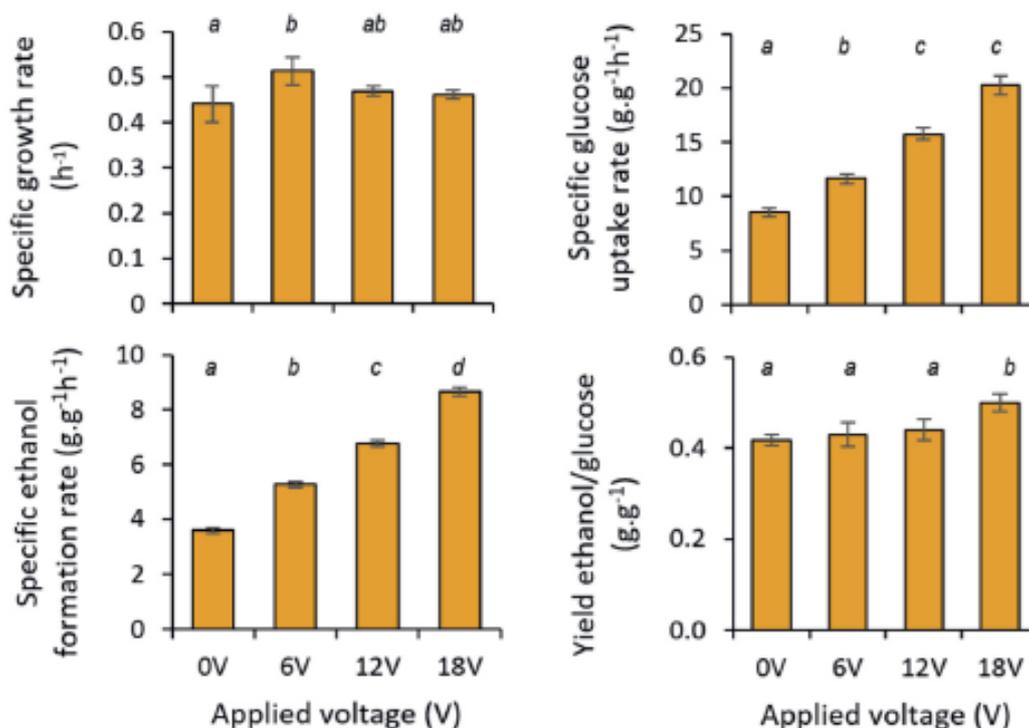


Ilustración 8. Parámetros cinéticos experimentales para las fermentaciones de *Z. mobilis* a diferentes voltajes aplicados. Letras diferentes indican significancia estadística ( $p < 0.05$ ). Los resultados se reportan como la media  $\pm$  desviación estándar ( $n = 3$ ). [9]

El efecto de los campos eléctricos sobre el metabolismo celular se centra en el transporte de sustratos y la actividad enzimática. En *Z. mobilis*, el sistema fosfotransferasa (PTS) responsable del transporte de glucosa se ve afectado, mientras que en *S. cerevisiae* se observa un aumento en la actividad de la hexoquinasa y el transporte de hexosas. Además, la transformación de piruvato en etanol, catalizada por las enzimas piruvato descarboxilasa (PDC) y alcohol deshidrogenasa (ADH), también es potenciada por los campos eléctricos.

Estos hallazgos sugieren que los campos eléctricos moderados pueden inducir reorganizaciones moleculares en las membranas celulares, lo que impacta directamente el flujo de iones y la actividad de receptores de membrana.

La conclusión de este experimento destaca el potencial de la electrofermentación como herramienta para mejorar la producción de etanol y otros biocombustibles. Este enfoque promete ser una estrategia viable para su implementación en procesos industriales, considerando las siguientes oportunidades:



- Diseño de biorreactores: Incorporación de electrodos modulares que faciliten la aplicación controlada de campos eléctricos.
- Optimización de procesos: Desarrollo de configuraciones geométricas y condiciones operativas que maximicen la eficiencia de los bioprocesos.
- Integración tecnológica: Adaptación de sistemas bioelectroquímicos en instalaciones industriales existentes para potenciar la productividad.

Asimismo, se identifica como prioridad para futuras investigaciones evaluar de forma directa la actividad de enzimas clave involucradas en los procesos metabólicos. Estas líneas de estudio podrían consolidar la electrofermentación como una tecnología de vanguardia en la bioindustria.

### 2.6 Aplicación de formas de voltaje basadas en Técnicas Voltamétricas

La voltametría es una técnica utilizada para examinar las reacciones electroquímicas. Cuando el electrodo es un sólido metálico, se denomina técnicas voltamétricas. En esta aplicación, el objetivo no es determinar ni cuantificar sustancias químicas en el sistema, sino aplicar potenciales controlados para favorecer el proceso de fermentación en una celda de electrólisis microbiana.

Es importante destacar que, aunque nuestro interés se desvía de la práctica habitual, hemos tomado como referencia las técnicas voltamétricas, para diseñar las formas de onda con las que estudiaremos el proceso de fermentación. En este sentido, las formas de onda derivadas de las técnicas voltamétricas no se utilizan para extraer datos electroquímicos, sino como herramientas para modelar o replicar condiciones específicas que se asemejan a las observadas en estudios electroquímicos. Por este motivo, hemos decidido introducir y explicar brevemente en qué consisten las técnicas voltamétricas.

Las técnicas voltamétricas se caracterizan por aplicar un potencial eléctrico controlado a un sistema electroquímico y medir la corriente resultante. Son ampliamente utilizadas para investigar reacciones redox, caracterizar materiales y determinar sustancias químicas.

Las técnicas voltamétricas se clasifican, esencialmente, por la diferente forma de variación del potencial. En la ilustración 9, se presenta una clasificación de varios tipos de análisis voltamétricos según el tipo de potencial aplicado [11].

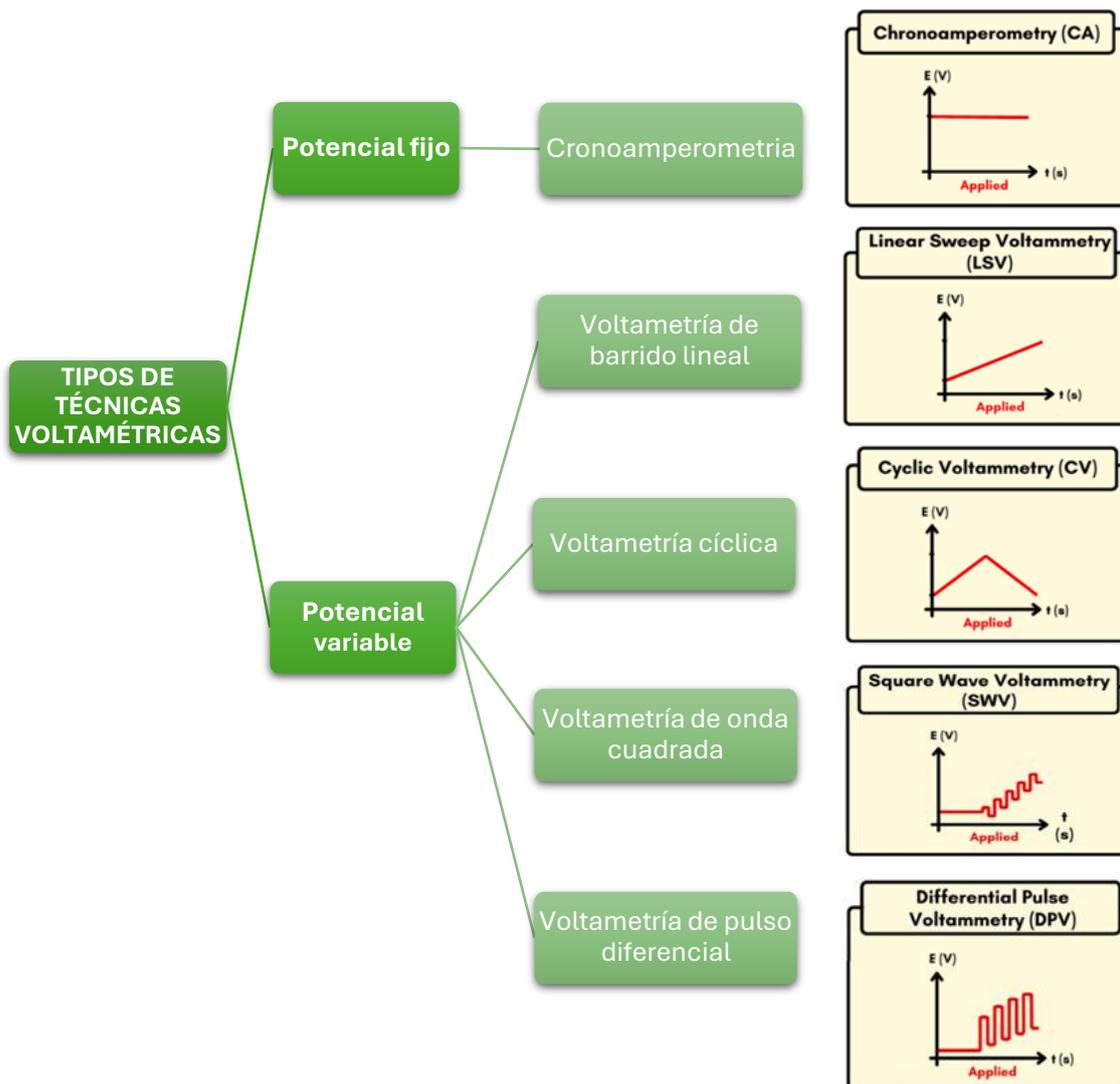


Ilustración 9. Clasificación de las técnicas voltamétricas

### 2.6.1 Cronoamperometría (Escalón)

La cronoamperometría es una técnica que ayuda a medir cómo se difunden las sustancias y a estudiar las reacciones químicas. A diferencia de otras técnicas, esta puede obtener esta información en un solo experimento. Como se muestra en la ilustración 10, su proceso consiste en aplicar un cambio en el potencial del electrodo y monitorear la corriente resultante en función del tiempo. En este proceso, se generan corrientes de carga altas, que decaen exponencialmente con el tiempo [12].

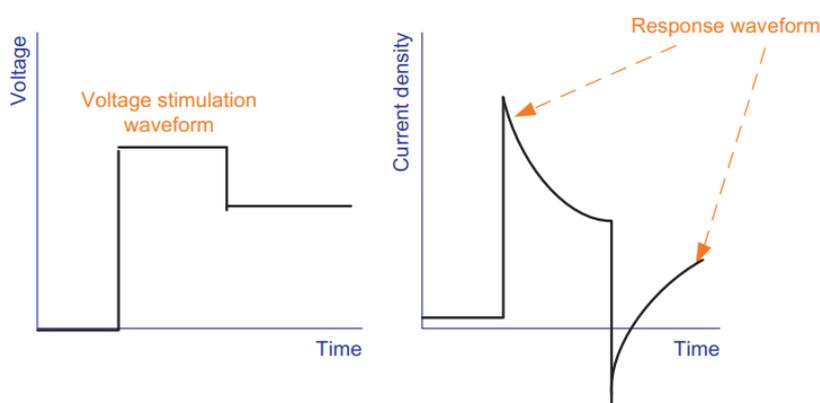


Ilustración 10. Forma de onda y respuesta de una cronoamperometría [12]

### 2.6.2 Voltametría de barrido lineal (Rampa)

La voltametría de barrido lineal es la técnica más sencilla de barrido. Tal como se observa en la ilustración 11, se utiliza un rango de potencial fijo que puede recorrer, desde el valor inicial hasta el valor final, en una dirección creciente o decreciente [13].

La velocidad de barrido del voltaje se calcula a partir de la pendiente de la línea. Al cambiar el tiempo necesario para barrer el rango, se alternará la velocidad de escaneo. Las características del voltamograma de barrido lineal registrado dependen de varios factores, incluyendo:

- La velocidad de la reacción de transferencia de electrones
- La reactividad química de las especies electroactivas
- La velocidad de barrido del voltaje

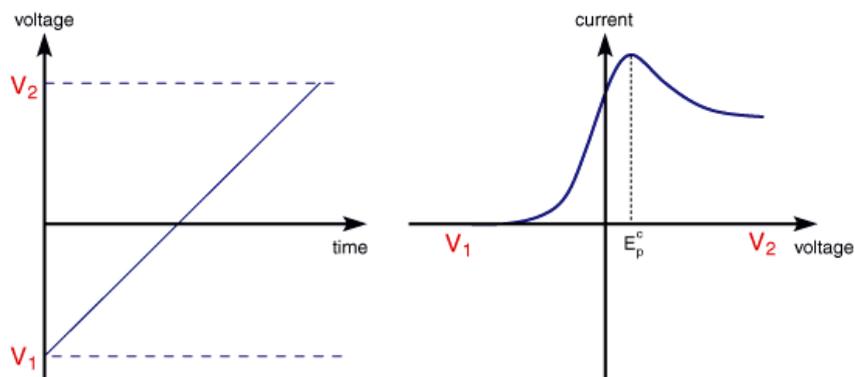


Ilustración 11. Voltamograma resultante de un barrido lineal [13]

El barrido comienza desde el lado izquierdo de la gráfica corriente/voltaje, donde no hay flujo de corriente. A medida que el voltaje se desplaza hacia la derecha, empieza a aumentar la corriente hasta que finalmente alcanza un pico antes de disminuir. La velocidad de transferencia de electrones suele ser rápida en comparación con la velocidad de barrido del voltaje, lo que permite que se establezca un equilibrio en la superficie del electrodo.

Si se modifica la velocidad de escaneo, la respuesta de la corriente también varía. La ilustración 12 muestra una serie de voltamogramas de barrido lineal registrados a distintas velocidades de escaneo para una solución electrolítica

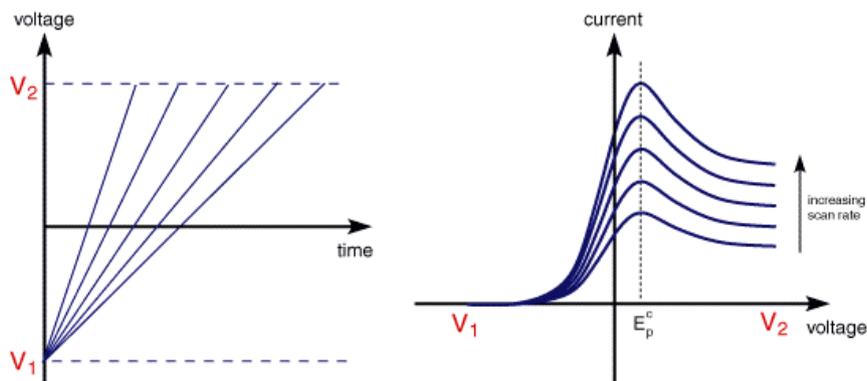


Ilustración 12. Serie de voltamogramas de barrido lineal registrados a diferentes velocidades de escaneo para una solución electrolítica [13]

Cada curva tiene la misma forma, pero la corriente total aumenta con la velocidad de escaneo. A velocidades de escaneo más lentas, el voltamograma tarda más en registrarse y la capa de difusión sobre el electrodo crece más. Esto reduce el flujo hacia el electrodo, por lo que la corriente es menor a velocidades lentas y mayor a velocidades rápidas.

En el contexto de electrofermentación, al aplicar un voltaje que cambia linealmente con el tiempo, se puede observar cómo las células microbianas responden a distintos niveles de energía, lo que ayuda a identificar el rango de voltajes más eficiente para la fermentación.

### 2.6.3 Voltametría cíclica

La voltametría cíclica es muy similar a la anterior. Como se muestra en la ilustración 13, el voltaje se barre entre dos valores a una velocidad fija, pero ahora, cuando el barrido de voltaje alcanza el valor de  $V_2$ , el escaneo se invierte y el voltaje vuelve al valor de  $V_1$ , originando una forma de onda triangular [13].

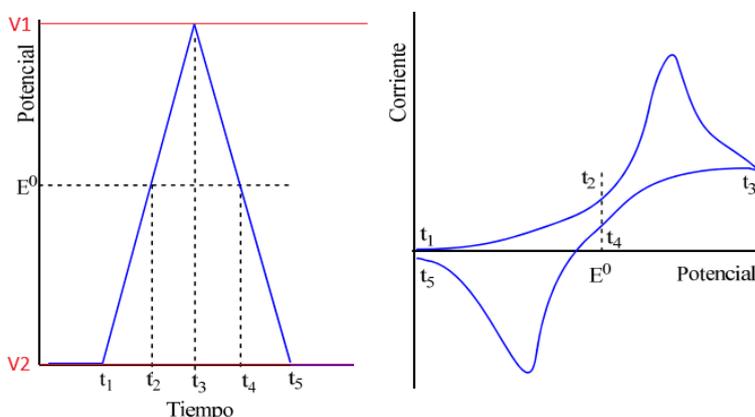


Ilustración 13. Voltagrama resultante de una voltametría cíclica [13]

En la voltametría cíclica, al inicio del barrido los electrodos están en su estado reducido y no hay conversión a la forma oxidada porque el potencial es bajo. Cuando el potencial aumenta, surge una corriente anódica que alcanza su pico al llegar al potencial redox, momento en que cualquier especie reducida que toca el electrodo se oxida. Luego, la corriente disminuye al oxidarse completamente el electrodo.

Al invertir el voltaje, la corriente sigue disminuyendo mientras las especies oxidadas se convierten nuevamente en reactivos, replicando el comportamiento previo, pero en sentido contrario. La ilustración 14 muestra la influencia de la velocidad de barrido en la capa de difusión, similar a lo que ocurre en la voltamperometría de barrido lineal.

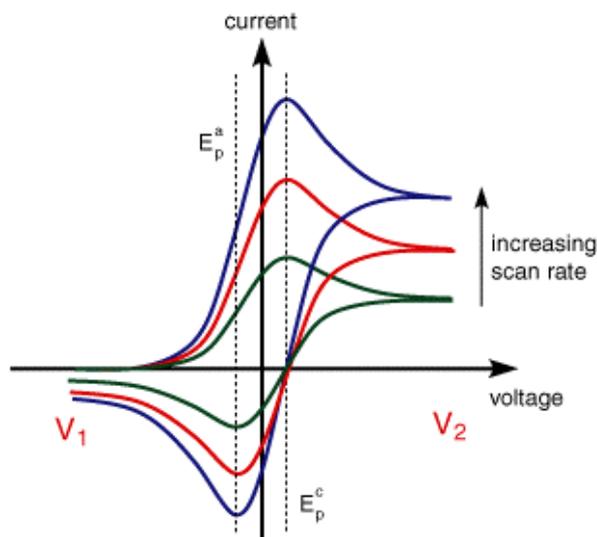


Ilustración 14. Serie de voltamogramas de voltametría cíclica registrados a diferentes velocidades de escaneo [13]

### 2.6.4 Voltametría de onda cuadrada

La voltametría de onda cuadrada es una técnica cuya forma de onda es una variación de la voltametría de barrido lineal que combina una onda cuadrada con un barrido de potencial en escalera. Como resultado, el electrodo de trabajo experimenta dos pulsos, uno con un potencial directo y otro con un potencial inverso, para cada peldaño de la escalera [14].

El voltamperograma resultante presenta picos, como se observa en la ilustración 15, para cada especie electroactiva presente.

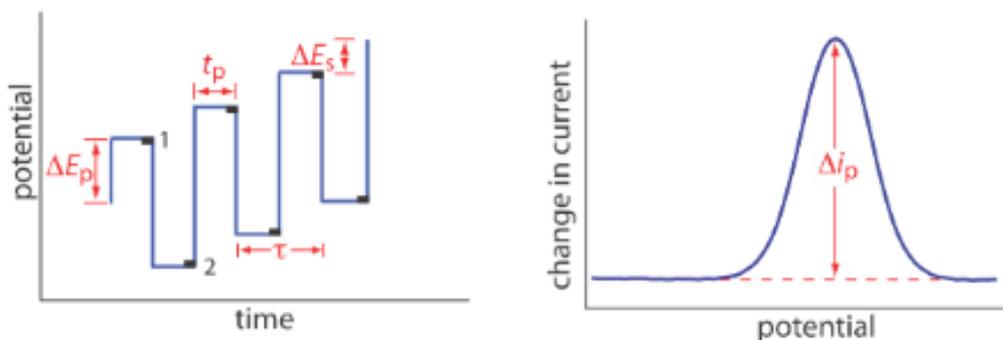


Ilustración 15. Voltograma resultante de una voltametría de onda cuadrada [15]

### 2.6.5 Voltametría de pulso diferencial

Esta técnica de voltametría es más avanzada y sensible que las anteriores, ya que puede superar las limitaciones principales de estas, principalmente aquellas relacionadas con las corrientes de carga. La forma de onda del voltaje aplicado, representada en la ilustración 16, combina pulsos de potencial con una rampa de potencial lineal [16].

Es ideal para aplicaciones donde se necesitan estudiar o detectar concentraciones extremadamente bajas de químicos, ya que mejora la detección de corrientes farádicas usando estos pulsos pequeños superpuestos en una forma de onda escalonada.

La voltametría de pulso diferencial se basa en una medición diferencial: la corriente se muestrea en dos momentos específicos, justo antes del pulso y al final del pulso. Esto permite registrar la corriente de fondo antes del pulso y la corriente farádica al final del pulso, lo que permite mejorar la señal de corriente redox al restar la corriente de fondo.

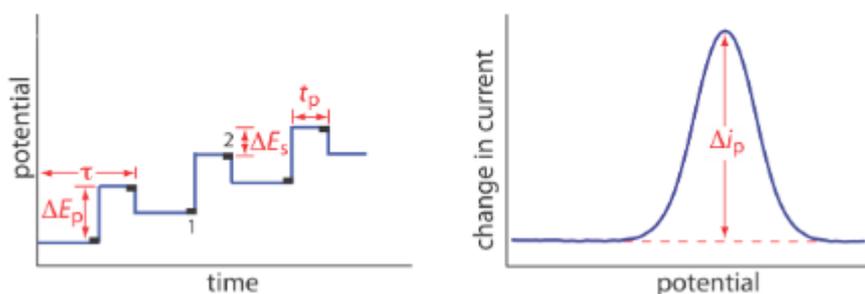


Ilustración 16. Voltagrama resultante de una voltametría de pulso diferencial [15]

Cabe señalar que la voltametría de pulso diferencial y la voltametría de onda cuadrada son técnicas voltamétricas pulsadas, pero difieren en sus formas de onda y características operativas. La de pulso diferencial utiliza pulsos discretos superpuestos a un potencial base, creando un patrón de excitación distintivo. En cambio, la de onda cuadrada emplea una forma de onda cuadrada simétrica con pulsos hacia adelante y hacia atrás a una frecuencia y amplitud específicas.



# 3 DESARROLLO DEL HARDWARE DEL EQUIPO

En este capítulo se analiza el hardware utilizado en la construcción del biorreactor. Se describe primero el programa utilizado para implementar el software de control, que condiciona la selección del hardware. A continuación, se detalla la tarjeta de adquisición de datos empleada para capturar y procesar las señales eléctricas del proceso bioelectroquímico. Por último, se presenta el diseño del circuito electrónico, integrado en una placa de circuito impreso para la lectura de la corriente.

## 3.1 Instrumentación electrónica

Actualmente, los sistemas electroquímicos son controlados mediante ordenadores en lugar de equipos especializados, lo que permite aumentar la autonomía de los experimentos, reduciendo considerablemente el tiempo que un especialista debe dedicar a la supervisión y ejecución de estos. Además, esta configuración permite almacenar grandes cantidades de datos en formato digital, presentar los resultados en tiempo real y realizar un análisis posterior utilizando herramientas de procesamiento matemático.

Con el objetivo de reducir los costes de investigación y facilitar la realización de experimentos electroquímicos sin necesidad de una inversión considerable, se propone desarrollar un sistema de instrumentación electrónica capaz de aplicar diferentes formas de onda de voltaje en un biorreactor, así como medir el consumo de corriente en el circuito.

## 3.2 Instrumentación virtual

La instrumentación virtual representa una evolución en el campo de las mediciones y el control de dispositivos, permitiendo sustituir los instrumentos tradicionales por los ordenadores personales.

Este concepto surge con la idea de usar el ordenador no solo para captar datos de señales físicas, como temperatura o presión, sino también para analizarlos, almacenarlos y distribuirlos mediante software especializado. A diferencia de los equipos tradicionales con funciones predefinidas por el fabricante, la



### CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL HARDWARE DEL EQUIPO

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



instrumentación virtual da al usuario la libertad de personalizar el funcionamiento del sistema, adaptándolo y optimizándolo a sus necesidades.

Un instrumento virtual se compone esencialmente tres componentes: un ordenador, una tarjeta de adquisición de datos y un software que gestione la interacción entre el hardware y el usuario. Con este sistema, es posible adaptar cualquier ordenador para que funcione, por ejemplo, como un osciloscopio, permitiendo visualizar tanto la onda como su espectro de potencia en tiempo real, algo que difícilmente lograría un dispositivo convencional. Esta flexibilidad se traduce en menores costos, ya que elimina la necesidad de invertir en instrumentos especializados para cada tarea.

A continuación, se recoge una tabla comparativa que recoge las principales diferencias entre los instrumentos convencionales y los instrumentos virtuales [17]:

*Tabla 4. Instrumentación Convencional vs Instrumentación Virtual*

<b>Instrumento Convencional</b>	<b>Instrumento Virtual</b>
Definido por el fabricante	Definido por el usuario.
Funcionalidad específica, con conectividad limitada.	Funcionalidad limitada, orientado a aplicaciones, conectividad amplia.
Hardware en la clave.	Software es la clave.
Alto costo/función.	Bajo costo/función, variedad de funciones, reusable.
Arquitectura “cerrada”.	Arquitectura “abierta”.
Lenta incorporación de nuevas tecnologías.	Rápida incorporación de nuevas tecnologías.
Bajas economías de escala, alto costo de mantenimiento.	Altas economías de escala, bajos costos de mantenimiento.

En comparación con los instrumentos tradicionales, los instrumentos virtuales permiten adaptar y modificar las funcionalidades a las necesidades del usuario a través de software, en lugar de depender de circuitos fijos. Esto reduce los costos de inversión y desarrollo, al mismo tiempo que mejora la calidad del producto y acelera el tiempo de comercialización. Además, la modularidad del software permite crear soluciones personalizadas y distribuir tareas entre múltiples dispositivos. Gracias a los avances en tecnología, los instrumentos virtuales también ofrecen una mayor precisión, velocidad de adquisición de datos y aislamiento de señales, todo a un costo mucho menor que los dispositivos dedicados tradicionales.



## CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL HARDWARE DEL EQUIPO

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



En sus inicios, los instrumentos virtuales se creaban utilizando lenguajes de programación textual como C, C++ o Basic. Sin embargo, estos enfoques presentaban ciertas dificultades, ya que resultaban bastante complejos en términos de programación. La gran cantidad de líneas de código complicaba la capacidad de hacer modificaciones y aumentaba la dificultad de mantenimiento. Esto obligaba a los ingenieros y científicos a tener un alto nivel de conocimiento en programación o, en su defecto, contratar empresas especializadas para el desarrollo del sistema. Además, el tiempo requerido para completar el diseño del sistema era considerablemente largo.

Con el tiempo, fueron surgiendo nuevas herramientas como LabVIEW que han resuelto muchas de estas limitaciones [18]. A diferencia de los lenguajes de programación tradicionales, LabVIEW utiliza un entorno de programación gráfica que permite a los usuarios desarrollar aplicaciones complejas mediante un lenguaje visual basado en diagramas de bloques, lo cual facilita la creación y comprensión de programas de medición y control sin necesidad de conocimientos avanzados de programación textual. Esta accesibilidad permite que los usuarios diseñen sistemas a medida de manera intuitiva. Gracias a su amplia compatibilidad con dispositivos de hardware, facilita la integración de diversos equipos en una única plataforma de control, simplificando el proceso de configuración y uso.



*Ilustración 17. Logo del software de instrumentación virtual LabVIEW [19]*

La plataforma ofrece bibliotecas especializadas para tareas de instrumentación, como adquisición de datos y procesamiento de señales, lo que permite desarrollar aplicaciones de forma rápida. Además, LabVIEW permite crear interfaces gráficas de usuario interactivas, brindando a los usuarios un control directo y visual de sus sistemas en tiempo real.

Finalmente, su estructura modular y escalable permite que LabVIEW se adapte tanto a pequeños proyectos de investigación como a sistemas complejos, lo que lo convierte en una opción estándar en instrumentación virtual.

### 3.3 Tarjeta de adquisición

La adquisición de datos, también conocida como DAQ, o captura de señales, consiste en recoger muestras del entorno físico a partir de un sistema analógico y convertirlas en datos que puedan ser procesados por un ordenador o dispositivos electrónicos dentro de un sistema digital. Este proceso implica tomar diversas señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en un ordenador. El dispositivo que se encarga de hacer este proceso de transformación es el módulo de digitalización. La ilustración 18 muestra el proceso de transformación, que se resume en las siguientes etapas:

1. La señal ingresa al transductor, un dispositivo que convierte la magnitud física a medir en una señal de salida procesable por el sistema.
2. Luego, en la etapa de acondicionamiento de señal, se filtra y adapta la señal proveniente del transductor para que sea compatible con la entrada del convertidor analógico-digital.
3. Finalmente, el convertidor analógico-digital transforma la señal analógica de entrada en una señal digital a la salida del sistema.

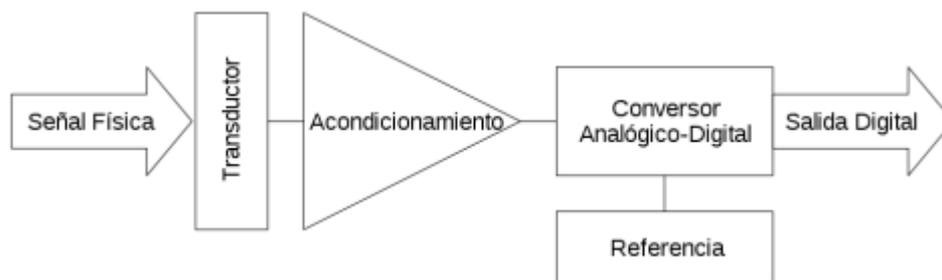


Ilustración 18. Esquema del proceso de transformación de señales físicas a salidas digitales [20]

Las características de un sistema de adquisición de datos dependen tanto de las propiedades de los datos analógicos como del procesamiento al que se someten. En función del entorno de aplicación, estos sistemas pueden clasificarse en sistemas para entornos favorables y en sistemas diseñados para entornos hostiles [21].

Los sistemas de la primera categoría se emplean comúnmente en aplicaciones de laboratorio, pruebas de instrumentos para recopilar datos de deriva a largo plazo, instrumentos de alta calibración y mediciones frecuentes en investigación. En estas aplicaciones, el enfoque está en la precisión de las mediciones, sin grandes exigencias en la protección de los datos analógicos. Por el contrario, los sistemas



## CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL HARDWARE DEL EQUIPO

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



para entornos hostiles están diseñados específicamente para proteger la integridad de los datos analógicos en condiciones adversas, como en sistemas de monitorización de redes eléctricas y control de procesos industriales. Estas aplicaciones demandan dispositivos con amplio rango de operación térmica, blindaje efectivo, o un procesamiento intensivo de datos digitales. En entornos de laboratorio, como es nuestro caso, las mediciones se realizan en un rango de temperatura más restringido y con menor nivel de ruido eléctrico.

Los principales factores que definen la configuración y los subsistemas de un sistema de adquisición de datos incluyen:

- Precisión y resolución requeridas
- Cantidad de canales necesarios
- Tipo de señal (analógica o digital)
- Configuración de canal único o multicanal
- Tasa de muestreo por canal
- Necesidades de acondicionamiento de señal para cada canal
- Coste del sistema

Actualmente, existen entornos especializados en la adquisición de datos para aplicaciones en condiciones favorables como las de este proyecto. Entre ellos destacan Python con bibliotecas como PyDAQmx, NumPy y SciPy, ampliamente utilizado en investigación y aplicaciones industriales gracias a su flexibilidad y a la variedad de herramientas de análisis que ofrece. EPICS empleado en grandes instalaciones científicas y laboratorios avanzados, ahora potenciado con herramientas modernas como Control System Studio y PyEPICS. MATLAB que sigue siendo una opción robusta para el análisis de datos en entornos de laboratorio, especialmente por su integración con Simulink y bibliotecas especializadas en IoT y sistemas embebidos. Y LabVIEW, la herramienta utilizada en este proyecto, desarrollada por National Instruments, que continúa siendo una de las opciones preferidas para la monitorización de sistemas, incluso con hardware de última generación.

De la misma manera que se toma una señal eléctrica y se transforma en una digital para enviarla al ordenador, también se puede tomar una señal digital o binaria y convertirla en una eléctrica. En este caso, el elemento encargado de la transformación es una tarjeta o módulo de adquisición de datos de salida. Estas tarjetas se pueden dividir en dos componentes principales:

- El **hardware** que, generalmente incluye las interfaces entre la señal y el PC. Estas interfaces pueden presentarse en forma de módulos que se

conectan al ordenador a través de diversos puertos (paralelo, serie, USB, etc.)

- El **software** que, suele venir incluido con el hardware DAQ o ser proporcionado por otros proveedores. Permite que el sistema operativo reconozca el hardware DAQ y proporcione acceso a las señales de lectura y escritura gestionadas por el hardware DAQ.

Para el proyecto, la conexión entre el software y la celda electroquímica se realiza con la tarjeta NI USB 6008, como se muestra en la Ilustración 19. La Ilustración 20 presenta las conexiones de la tarjeta.



Ilustración 19. Tarjeta NI USB 6008 [22]

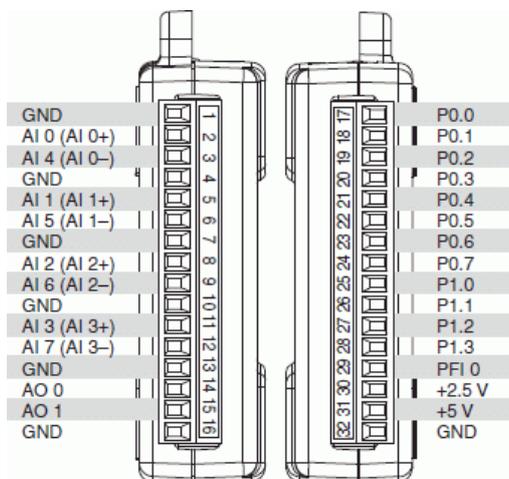


Ilustración 20. Conexiones tarjeta NI USB 6008 [23]



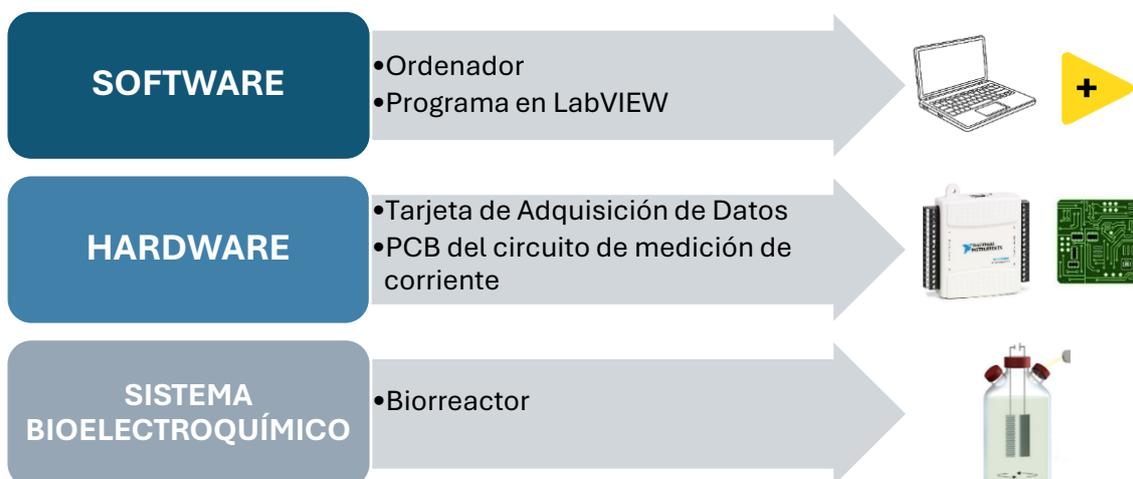
La tarjeta NI USB-6008 es un dispositivo de adquisición de datos multifunción diseñado para ofrecer una solución económica y versátil en aplicaciones experimentales o educativas. Este hardware cuenta con 8 entradas analógicas con una resolución de 12 bits y una velocidad de muestreo de hasta 10 kS/s, lo que permite capturar señales con una precisión adecuada para una amplia gama de aplicaciones. Dispone de 12 canales de E/S digitales configurables como entradas o salidas, y 2 salidas analógicas con una frecuencia máxima de actualización de 150 Hz, ideales para generar señales básicas de control o estímulo. El dispositivo es compacto, ligero y se alimenta directamente a través del puerto USB, eliminando la necesidad de fuentes de alimentación externas y facilitando su portabilidad. Las conexiones se realizan de forma sencilla a través de terminales de tornillo [24].

Además, la tarjeta incluye el software NI-DAQmx, una plataforma avanzada de control y adquisición de datos. Este software facilita la configuración, adquisición y análisis de señales, permitiendo a los usuarios implementar mediciones complejas sin un gran esfuerzo.

### 3.4 Diseño y construcción del sistema de experimentación

En este apartado se presenta un esquema del sistema desarrollado según lo visto hasta ahora. Como ya se planteó, un instrumento virtual para experimentación bioelectroquímica requiere un ordenador para controlar el hardware y proporcionar al usuario acceso a el entorno gráfico que gestiona el programa.

El hardware especializado para esta aplicación está compuesto por una tarjeta de adquisición de datos, específicamente el modelo NI USB 6008, y una placa de circuito impreso, ambas conectadas al sistema bioelectroquímico en estudio. La tarjeta de adquisición de datos actuará como conversor digital-analógico, transformando las formas de onda generadas en LabVIEW en señales de voltaje aplicables al sistema. Por su parte, la placa de circuito impreso permitirá la conexión de la celda electroquímica e integrará el circuito necesario para medir la intensidad de corriente que circula a través del sistema.



El sistema de experimentación desarrollado busca cumplir con los siguientes objetivos:

- Ofrecer al usuario un entorno gráfico intuitivo y fácil de usar, que le permita seleccionar la forma de onda para el experimento, registrar datos clave como el tipo de electrodos y su superficie, configurar la forma de onda dentro de los límites establecidos, y elegir tanto el nombre como la ubicación del archivo donde se exportarán los resultados.
- Garantizar la flexibilidad del sistema para permitir la implementación de diferentes protocolos experimentales, como ondas en escalón, en rampa, cíclicas, etc.
- Realizar la conversión de los valores numéricos generados por el programa a voltajes aplicables a la celda electroquímica.
- Realizar mediciones continuas de la intensidad que fluye a través del circuito.

### 3.5 Circuito para la integración del sistema de medición de corriente.

Uno de los objetivos planteados es la integración de un sistema de medición de corriente que permita monitorear la corriente que circula a través del sistema experimental durante todo el proceso. Es importante destacar que la tarjeta DAQ, empleada (NI USB-6008), está configurada para procesar únicamente señales de voltaje, por lo que no cuenta con entradas específicas para medir corriente.



## CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL HARDWARE DEL EQUIPO

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



Para superar esta limitación, se ha implementado un método indirecto basado en la medición del voltaje generado por una resistencia shunt. Las resistencias shunt son componentes electrónicos de bajo valor óhmico que, al colocarse en serie con el circuito, permiten calcular la corriente mediante la ley de Ohm ( $I = V/R$ ) a partir de la caída de voltaje en sus extremos. Este enfoque es particularmente útil en sistemas donde no es posible utilizar un amperímetro o en aquellos que solo pueden procesar señales de voltaje.

Es fundamental seleccionar una resistencia de bajo valor, para minimizar la caída de voltaje en el circuito. Esto asegura que la resistencia no interfiera de manera significativa con el resto del circuito, permitiendo que el sistema experimental funcione de manera óptima sin pérdidas de energía innecesarias. Aunque las resistencias shunt suelen utilizarse para medir corrientes altas, en este caso, dado que las corrientes esperadas son bajas, no es necesario utilizar componentes de alto rendimiento. Para el sistema desarrollado, se ha seleccionado una resistencia de 1 ohmio con una precisión del 5 %.

Por otro lado, la NI USB-6008 es una tarjeta de adquisición de datos diseñada principalmente para medir señales analógicas y no para suministrar grandes corrientes. Las salidas de voltaje de estas tarjetas tienen una capacidad limitada en cuanto a la corriente que pueden proporcionar, lo que restringe la cantidad de energía disponible para alimentar un circuito externo. En concreto, la máxima corriente que el dispositivo puede suministrar en su salida sin comprometer su funcionamiento normal es de 5mA [24]. Si la carga requiere más corriente que este límite, puede surgir problemas como la distorsión de la señal, la reducción del voltaje de salida o incluso daño al dispositivo.



#### Analog Output

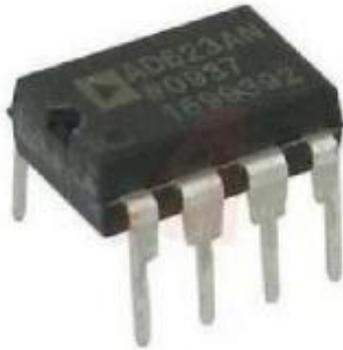
Analog outputs	2
Output resolution	12 bits
Maximum update rate	150 Hz, software-timed
Output range	0 V to +5 V
Output impedance	50 $\Omega$
Output current drive	5 mA
Power-on state	0 V
Slew rate	1 V/ $\mu$ s
Short circuit current	50 mA
<b>Absolute accuracy (no load)</b>	
Typical	7 mV
Maximum at full scale	36.4 mV

Ilustración 21. Especificaciones de las salidas analógicas de la tarjeta NI USB 6008 [24]

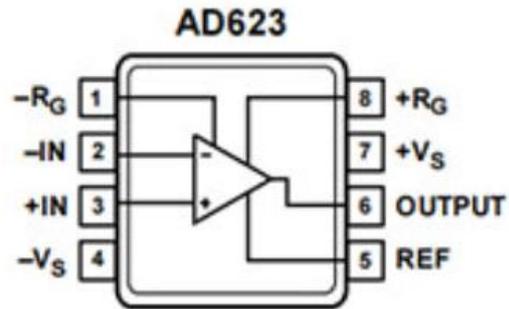
Debido a estas restricciones, las señales de corriente generadas en el circuito son muy pequeñas, lo que dificulta su medición directa. La caída de voltaje en la resistencia shunt de 1 ohmio será proporcional a la corriente que fluya. Según las especificaciones de la tarjeta y el voltaje máximo esperado, la caída de potencial máxima prevista en esta resistencia es la siguiente:

$$\Delta V_{resistencia} = I \cdot R = 0.005 \text{ A} \cdot 1 \Omega = 0.005 \text{ V} = 5 \text{ mV} \quad (4)$$

Sin embargo, la baja magnitud de la señal puede generar problemas de resolución y exactitud debido a las limitaciones del convertidor analógico-digital de la tarjeta DAQ. Para resolver este inconveniente, se ha incorporado un amplificador diferencial AD623, mostrado en la ilustración 23 [25]. Este dispositivo permite amplificar la señal diferencial generada por la caída de voltaje en la resistencia de 1 ohmio, sin introducir un ruido significativo en el circuito.



*Ilustración 23. Amplificador Instrumental AD623AN [25]*



*Ilustración 22. Configuración de los pines de amplificador AD623AN [25]*

De este modo, la señal amplificada se adapta al rango de medición del ADC de la tarjeta DAQ, logrando los siguientes beneficios:

- Mayor sensibilidad: La amplificación aumenta la sensibilidad del sistema, facilitando la detección de cambios en la corriente medida.
- Mejor relación señal-ruido: la señal puede ser débil en comparación con el ruido electrónico presente en el sistema. Al amplificar también se aumenta su amplitud en relación con el ruido, lo que facilita la medición de la señal que nos interesa.

Además, el AD623 tiene una ganancia ajustable, lo que permite adaptar la amplificación a la magnitud de la señal según la corriente que fluye por el circuito. La ganancia puede tomar valores entre 1 y 1000, ajustable mediante el valor de resistencia  $R_G$ , según la siguiente ecuación:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{100 \text{ K}\Omega}{R_G} \quad (5)$$

Por lo que en nuestro caso deberemos usar una resistencia de 100  $\Omega$ :

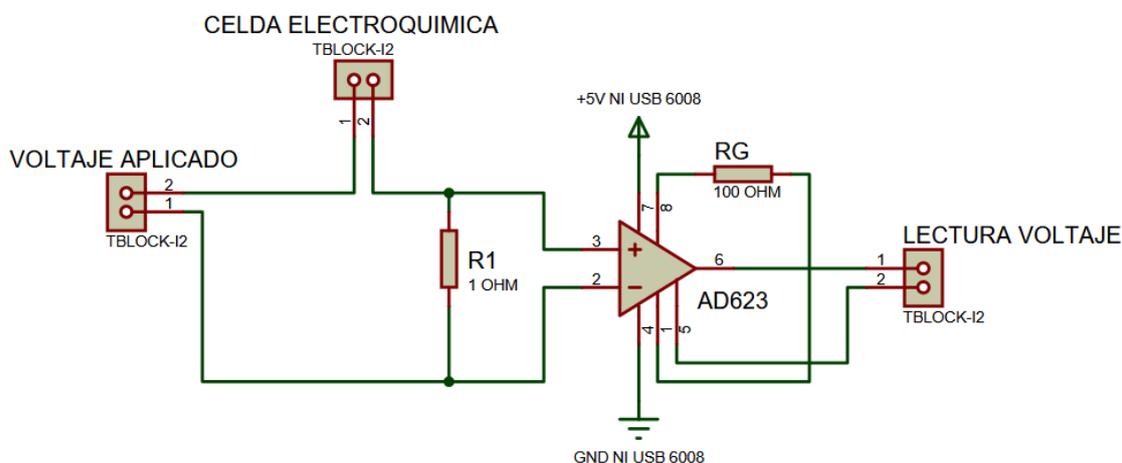
$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{100 \text{ K}\Omega}{R_G} = 1000 \rightarrow R_G = \frac{100 \text{ K}\Omega}{(1000 - 1)} = 100.1 \Omega \approx 100 \Omega \quad (6)$$

El AD623 es un dispositivo de bajo costo, ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requieren mediciones de señales pequeñas y es fácilmente integrable en sistemas de medición.

El valor de voltaje a la salida del amplificador será leído por la tarjeta DAQ, para ello se ha optado por utilizar entradas diferenciales para mejorar la calidad de la medición. Éstas permiten medir la diferencia de voltaje entre dos puntos del circuito, lo cual es útil para reducir el ruido y las interferencias que puedan presentarse, especialmente en señales de baja amplitud. A diferencia de las entradas de referencia única, que miden el voltaje con respecto a una referencia, las entradas diferenciales leen la diferencia entre dos señales, lo que proporciona una medición menos susceptible a ruidos comunes.

Además del sistema de medición de corriente, el circuito también facilita la conexión con la celda. Para ello, se conecta una salida analógica de la tarjeta DAQ al ánodo de la celda, mientras que el cátodo de la celda se conecta al sistema de medición de corriente, que a su vez lo conectará con tierra.

En el esquema presentado en la ilustración 24, se muestra el diseño del circuito implementado, creado mediante el software de diseño electrónico Proteus 8 Professional.



*Ilustración 24. Esquema del circuito diseñado en Proteus 8 para aplicación de voltaje en una celda de electrólisis microbiana y para la medición de la corriente consumida.*

En resumen, el sistema diseñado incorpora una resistencia shunt de 1 ohmio para medir la corriente de manera indirecta mediante la caída de voltaje generada en sus extremos. Esta señal es procesada por un amplificador diferencial AD623, configurado con una resistencia de 100 ohmios para obtener una ganancia de 1000, permitiendo así ajustarla al rango de medición del convertidor analógico-digital de la tarjeta DAQ empleada. Además, el circuito ha sido diseñado para facilitar las conexiones entre la celda experimental y la tarjeta DAQ.



### 3.6 Diseño de la PCB para el circuito de medición de corriente.

Se ha decidido integrar el circuito descrito en el apartado anterior en una Placa de Circuito Impreso (PCB, por sus siglas en inglés, *Printed Circuit Board*) con el objetivo de optimizar su integración dentro del sistema general. La implementación de una PCB permite una disposición más compacta y organizada de los componentes, lo que facilita la interconexión de las distintas partes del circuito y mejora su funcionalidad.

Una PCB es un tipo de circuito electrónico diseñado para albergar componentes y conductores dentro de una estructura mecánica [26]. En este caso, se ha optado por una PCB de una sola cara, donde todas las trazas conductoras están dispuestas en una única capa de cobre sobre un sustrato aislante. La placa está recubierta con una máscara de soldadura no conductora para proteger las conexiones y facilitar la identificación de los componentes electrónicos.

La fabricación de la PCB presenta múltiples ventajas, como la posibilidad de producción automática, facilitando su reproducción en serie. Además, permite un montaje más compacto, reduciendo significativamente el espacio requerido y los costes asociados. También minimiza los errores de cableado y reduce los efectos parásitos inductivos y capacitivos que pueden surgir en conexiones tradicionales.

El proceso de fabricación de la PCB se ha llevado a cabo en el laboratorio de electrónica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid. Durante el proceso se han seguido los siguientes pasos:

#### 1. Impresión del fotolito de la placa:

El diseño del circuito se realizó utilizando el programa Proteus 8 Professional. Este diseño se muestra en la ilustración 25. Durante el proceso, se definieron las dimensiones de las pistas para asegurar que soporten la corriente necesaria y se seleccionaron las plantillas adecuadas para los componentes que forman la placa.

El ruteo de las conexiones se planificó para aprovechar al máximo el espacio disponible, evitando cruces innecesarios y manteniendo un diseño limpio y funcional. Además, se incluyeron puntos de montaje y terminales de conexión bien identificados para facilitar la fabricación y el ensamblaje del circuito.

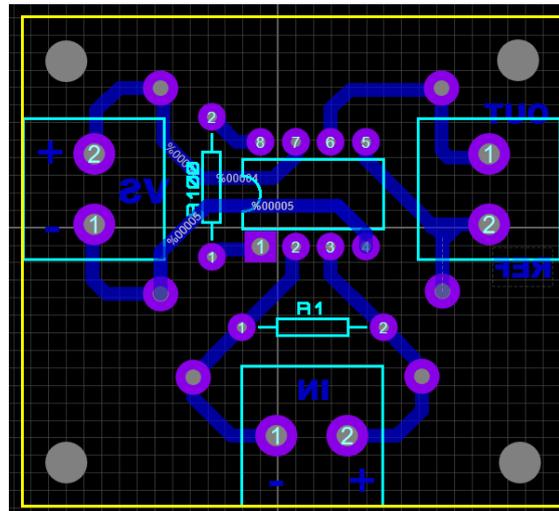


Ilustración 25. Diseño de la PCB en Proteus 8 Professional.

El diseño anterior se imprime en papel vegetal, permitiendo el paso de luz solo en las áreas deseadas durante la insolación. La Ilustración 26 muestra el fotolito de la PCB diseñada, utilizada para definir las zonas donde el cobre será atacado o preservado en el proceso de fabricación.

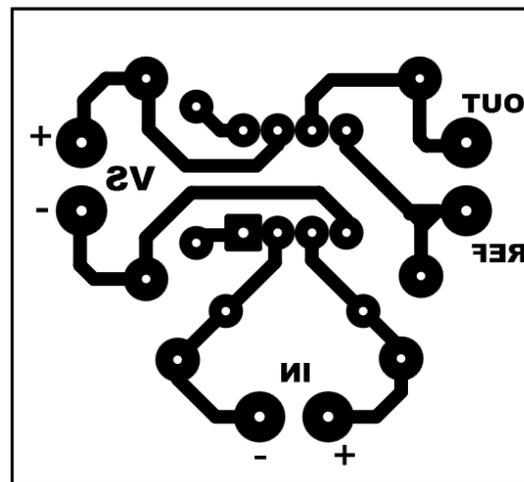


Ilustración 26. Fotolito de la PCB diseñada.

#### 2. Selección de la placa con resina fotosensible positiva:

Se utiliza una placa de fibra de vidrio con una única cara cubierta de cobre y recubierta con una resina fotosensible. Esta resina está protegida por un adhesivo opaco que debe retirarse en condiciones de poca luz o bajo una luz roja para evitar daños en la resina.



### 3. Taladrado:

Se perforan las vías donde se insertarán los componentes electrónicos y se realizarán las soldaduras. El grosor de las brocas varía según el componente, siendo comunes las de 0.8 mm o 0.9 mm para componentes estándar y hasta 2 mm para elementos más grandes. Este paso podría realizarse también al final del proceso, en nuestro caso se hizo de forma previa a la insolación.

### 4. Insolación:

El fotolito se coloca sobre la placa y se fija para evitar desplazamientos. Ambos se introducen en la insoladora, donde se expone la placa a radiación ultravioleta. El tiempo de exposición, depende del tipo de resina y de la intensidad de la luz UV, aunque generalmente dura unos dos minutos. Durante este tiempo se transfiere el dibujo del fotolito a la placa fotosensible.

### 5. Revelado de la resina fotosensible:

La placa se sumerge en un baño con revelador positivo hasta que el diseño del fotolito se transfiere completamente a la resina. Este paso permite visualizar claramente las áreas protegidas y expuestas de la placa.

### 6. Ataque químico del cobre:

La solución utilizada para eliminar el cobre no protegido por la fotorresina puede variar, pero generalmente se emplea una mezcla compuesta por dos partes de agua, una parte de agua oxigenada y una parte de aguafuerte. Aunque esta proporción puede ajustarse según las características del cobre y las condiciones del proceso.

### 7. Lavado con agua:

Para eliminar lo químicos agregados en el proceso anterior.

### 8. Eliminación de la fotorresina sobrante:

Una vez finalizado el ataque químico y el lavado, la fotorresina que cubre las trazas de cobre restantes se elimina con alcohol, dejando el diseño del circuito completamente limpio.

En las ilustraciones 27 y 28 se recoge un renderizado 3D de cómo se vería la placa de circuito impreso diseñada previamente en el software Proteus, una vez ensamblada con los componentes seleccionados. Estas proporcionan una vista previa del diseño final, permitiendo verificar la disposición de los elementos y la correcta ubicación de cada componente sobre la PCB.

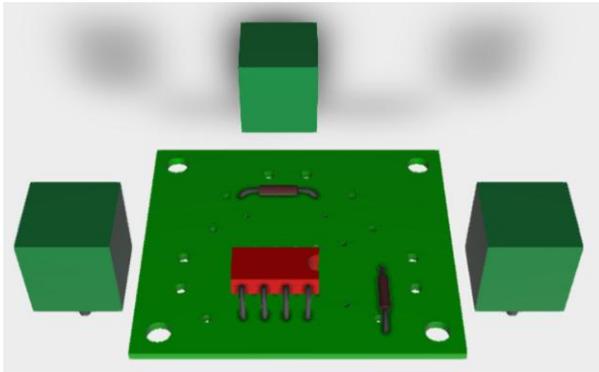


Ilustración 27. Renderizado de la PCB previo al ensamblado de componentes.

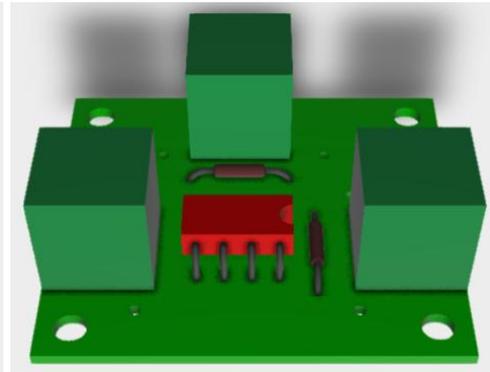


Ilustración 28. Renderizado de la PCB con los componentes ensamblados.

A continuación, se presentan imágenes de la PCB fabricada, con los componentes soldados:

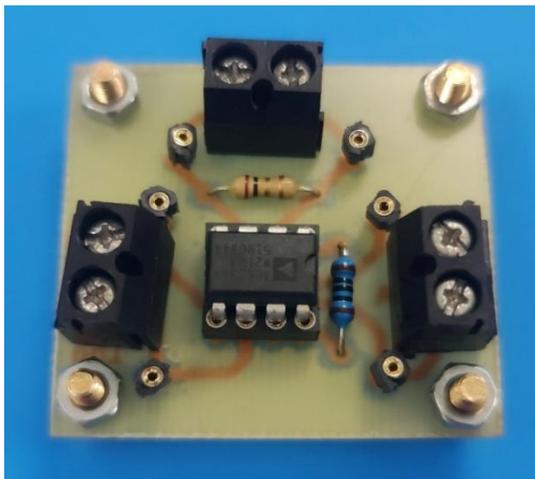


Ilustración 30. PCB fabricada con los componentes soldados (capa superior).

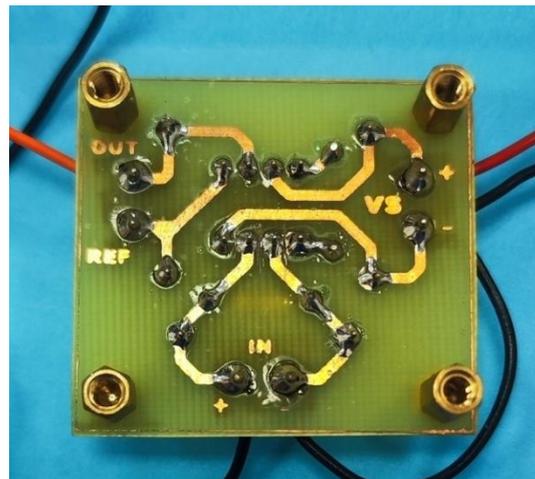


Ilustración 29. PCB fabricada con los componentes soldados (capa inferior).



# 4 DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO

En este capítulo se introduce el programa utilizado, LabVIEW, y se explica el funcionamiento general del programa desarrollado para este proyecto mediante un diagrama de flujo. Posteriormente, se describen de forma secuencial las pantallas que el usuario visualizará al realizar el experimento, junto con la programación detrás de cada una de ellas. Por último, se detalla el funcionamiento de los programas que generan las formas de onda, así como de los programas que calculan el tiempo de duración en función de los parámetros de configuración de la onda.

## 4.1 Características generales de LabVIEW

Los programas creados con LabVIEW se conocen como VIs (Virtual Instruments) debido a que tratan de imitar a un instrumento real, tanto en apariencia como en funcionalidad. Los VIs constan de dos partes diferenciadas, una de ellas destinada a la interacción del usuario con el instrumento y otra de código fuente donde se encuentran los bloques que permiten la funcionalidad del programa [27]. De esta forma, cada VI cuenta con un panel frontal y un diagrama de bloques. A continuación, se realizará una breve descripción de estos conceptos:

- El **panel frontal**, o interfaz gráfica del VI, permite la interacción con el usuario, recogiendo las entradas proporcionadas y mostrando las salidas generadas por el programa. Como se observa en la ilustración 31, este panel incluye varios elementos, como botones, pulsadores, potenciómetros y gráficos, entre otros. Cada uno de estos elementos puede ser un control o un indicador. Los controles sirven para introducir parámetros en el VI, mientras que los indicadores muestran los resultados obtenidos, ya sea de datos adquiridos o de operaciones realizadas.

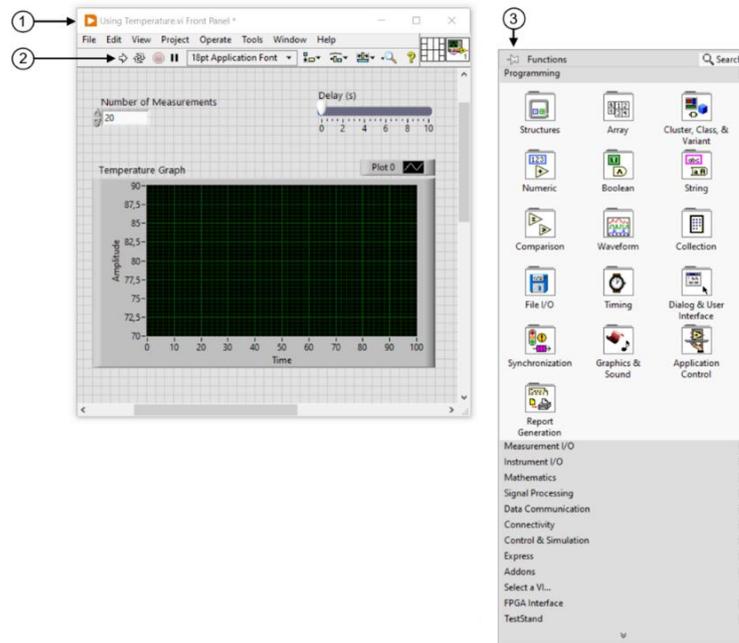


Ilustración 31. Panel Frontal en LabVIEW. (1) Ventana del panel frontal (2) Barra de herramientas (3) Paleta de funciones [28]

- El **diagrama de bloques** representa el código fuente del VI y es donde se implementa el programa para gestionar y procesar las entradas y salidas definidas en el panel frontal. Este diagrama incorpora funciones y estructuras integradas en las bibliotecas de LabVIEW. El lenguaje de programación empleado, conocido como lenguaje G, utiliza nodos elementales que cumplen un rol similar a las bibliotecas de funciones en otros lenguajes de programación.

Los controles e indicadores visibles y operables desde el panel frontal se representan en el diagrama de bloques mediante terminales que funcionan como nodos de control, indicadores, funciones o estructuras, como se muestra en la ilustración 32. El diagrama de bloques se construye conectando los diferentes elementos de manera similar a un circuito ya que los cables enlazan los terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, permitiendo el flujo de datos entre ellos.

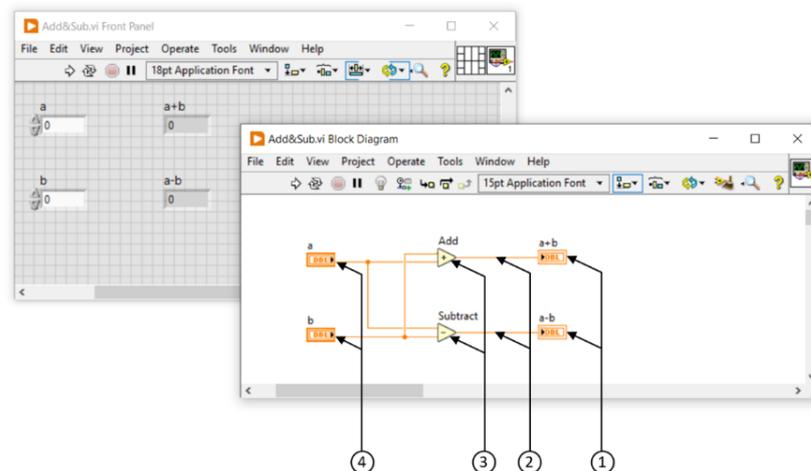


Ilustración 32. Diagrama de bloques de LabVIEW. (1) Terminales de indicador (2) Cables (3) Nodos (4) Terminales de control [28]

## 4.2 Software desarrollado

En este apartado se describirán los diferentes programas que conforman el software desarrollado para este proyecto en LabVIEW. Para cada programa, se presentará inicialmente el panel frontal, con el objetivo de exponer las funcionalidades ofrecidas al usuario. Posteriormente, se analizará el diagrama de bloques, donde se detalla la lógica de programación implementada para llevar a cabo dichas funcionalidades.

### 4.2.1 Funcionamiento general del software

El diagrama de flujo de la ilustración 33, recoge la estructura del proyecto desarrollado en LabVIEW, organizado en tres pantallas principales. La ejecución comienza con una pantalla inicial donde se decide si iniciar el experimento. Si se decide que sí, el programa abrirá la siguiente pantalla, donde el usuario puede elegir entre diversas formas de onda. Tras esta selección, se pasa a la configuración del experimento en la última pantalla, donde se introducen los parámetros necesarios y se inicia la ejecución. En este momento, el programa genera la forma de onda de voltaje seleccionada y registra en tiempo real el consumo de corriente asociado. Si la onda aún no ha finalizado, la ejecución continúa. Al finalizar, los datos recopilados se exportan automáticamente a un archivo Excel, que se guarda y cierra antes de finalizar la ejecución.



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO

Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

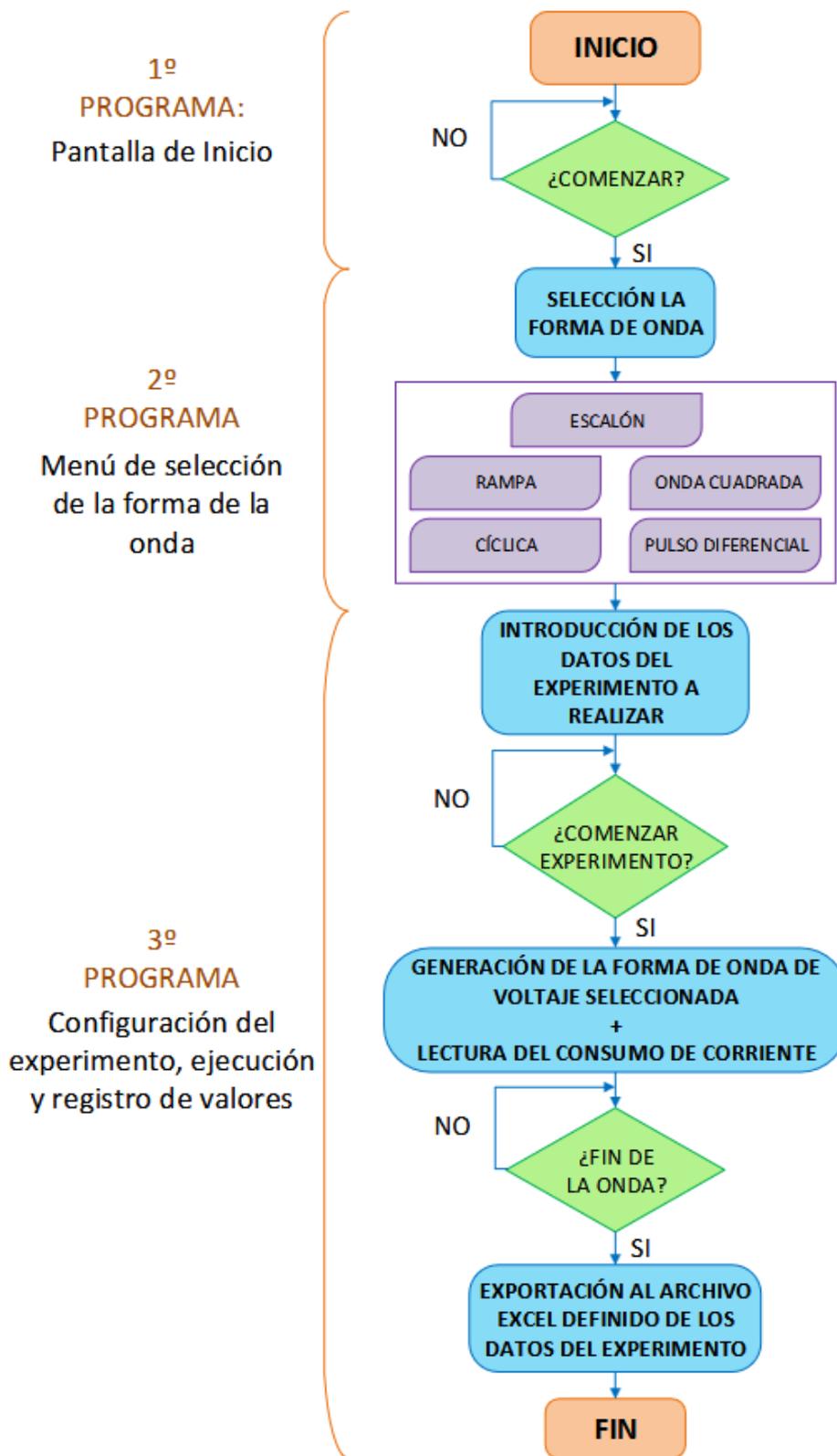


Ilustración 33. Diagrama de flujo del programa desarrollado para el proyecto.

### 4.2.2 Pantalla de inicio

#### ● INTERFAZ DE USUARIO

En la siguiente ilustración se muestra la pantalla que verá el usuario al iniciar el programa. En ella se muestra la función del programa y el nombre del autor. Si se presiona el botón “Salir”, el programa se cerrará de inmediato. Si se presiona el botón “Comenzar”, se abrirá la siguiente pantalla, en este caso, abrirá el VI que permite seleccionar la forma de onda con la que se desea realizar el experimento.

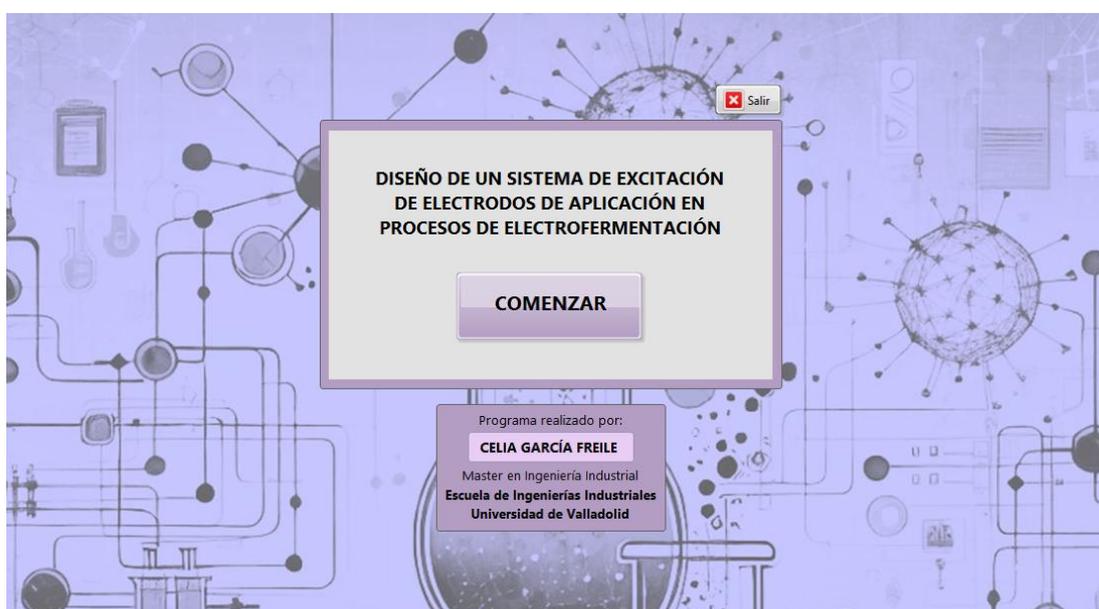


Ilustración 34. Panel frontal de la pantalla de Inicio.

#### ● DIAGRAMA DE BLOQUES

Para lograr esta operación en LabVIEW, primero creamos un SubVI (Virtual Instrument reusable que funciona como una función o subrutina), diseñado para abrir un nuevo VI al presionar un botón en otro. Su estructura se muestra en la ilustración 35.

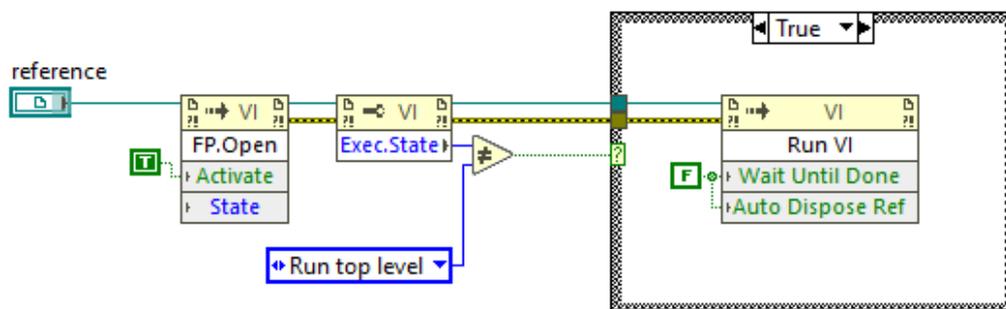


Ilustración 35. SubVI que permite el cambio entre programas

En este diagrama de bloques, se emplean dos Invoke Nodes y un Property Node, que son funciones utilizadas para interactuar con propiedades y métodos de un VI. El Property Node se usa para configurar propiedades como la apertura del panel frontal y establecer su estado de activación. Por otro lado, los Invoke Nodes permiten ejecutar métodos específicos del VI, como cambiar su estado de ejecución o ejecutar el VI en un nivel superior.

Una vez configurados estos nodos, se selecciona el modo de operación deseado. Por ejemplo, se puede definir si el VI se ejecutará de forma asíncrona o si el sistema debe esperar a que el VI termine su ejecución antes de continuar con el resto del flujo de trabajo. Además, se crea una constante de referencia que permite vincular el archivo VI que se desea abrir y controlar directamente desde el diagrama de bloques. Posteriormente, se genera un SubVI a partir de este VI para integrarlo de forma modular en el programa principal, facilitando la reutilización del código:



Ilustración 36. Icono del SubVI que permite la apertura de VI a partir de otros

A continuación, se muestra parte del programa que constituye el diagrama de bloques de la pantalla de inicio:

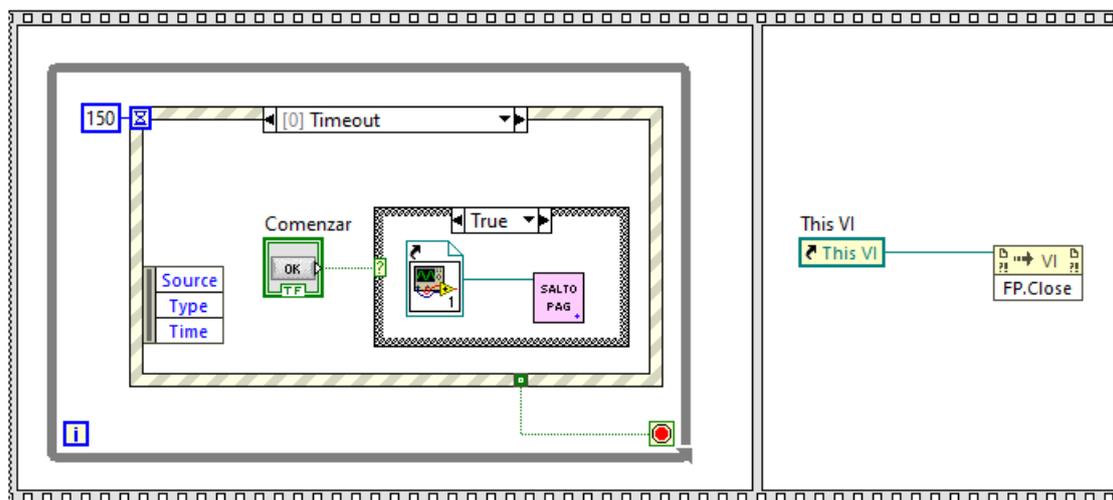


Ilustración 37. Diagrama de bloques de la pantalla de Inicio.

Este VI implementa un sistema interactivo basado en un bucle While, que contiene una estructura de eventos para gestionar acciones específicas según los eventos generados por el usuario o el sistema.

Cuando el usuario presiona el botón "Comenzar", se activa el evento correspondiente, lo que hace que el programa entre en el caso asociado, estableciendo el estado en verdadero (True). Esto desencadena la ejecución de una acción dentro de la estructura condicional. En este caso, la acción consiste en llamar al SubVI explicado anteriormente, denominado "Salto Pag", diseñado para gestionar la transición a otra página o módulo del programa. Este SubVI abrirá el VI de referencia, que en este caso corresponde al menú de selección de la forma de onda.

### 4.2.3 Menú de selección de la forma de onda

#### ● INTERFAZ DE USUARIO

La ilustración 38 muestra la interfaz que se mostrará al usuario al seleccionar “Comenzar” en la pantalla anterior. Permite elegir la forma de onda con la que se desea realizar el experimento. Al seleccionar una forma, se abrirá automáticamente el programa correspondiente. Además, ofrece la opción de regresar a la pantalla anterior o salir del programa.

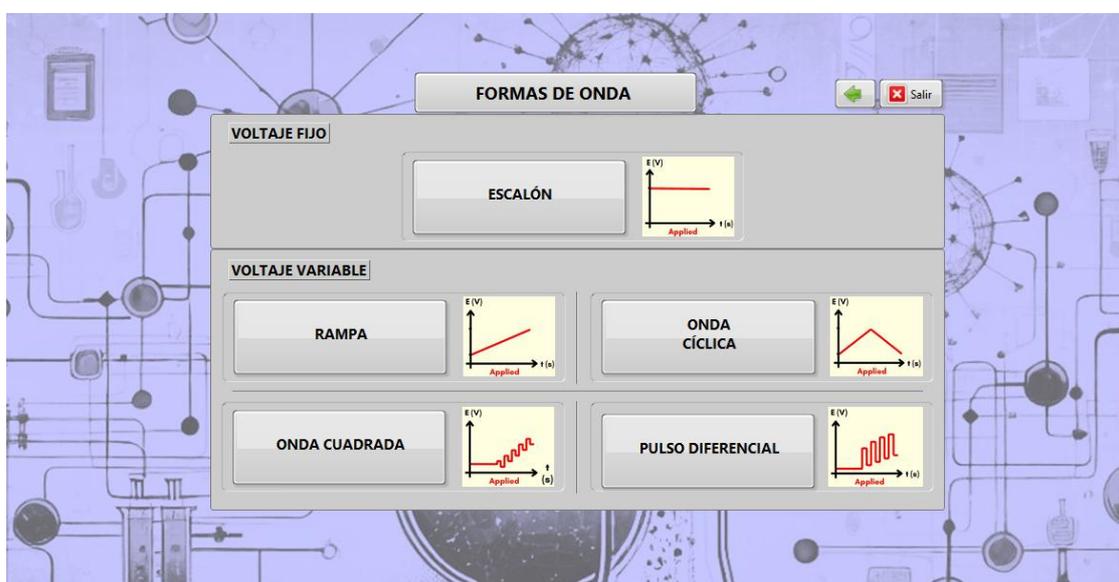


Ilustración 38. Panel frontal de la pantalla de selección de la forma de onda.

#### ● DIAGRAMA DE BLOQUES

A continuación, se presenta una sección del VI que conforma el diagrama de bloques del menú:

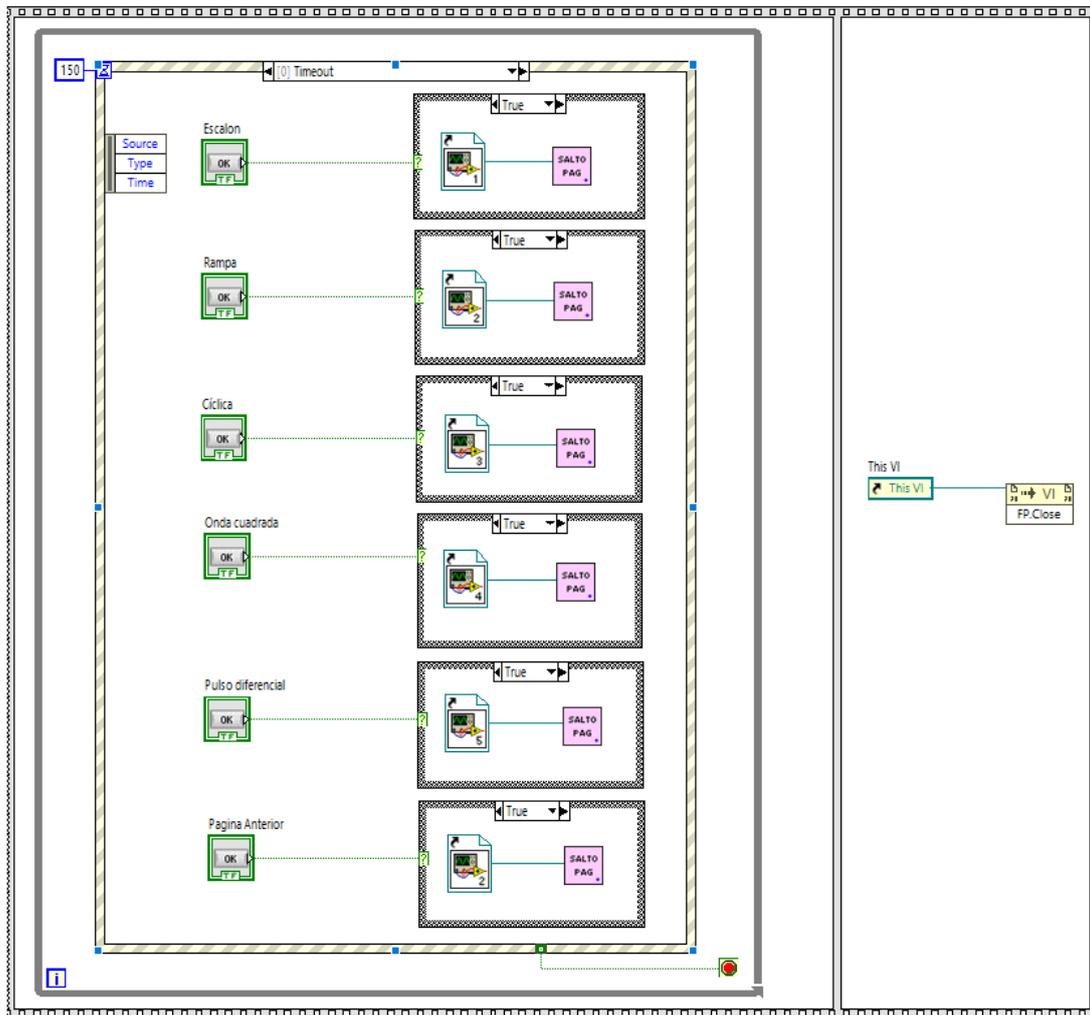


Ilustración 39. Sección del diagrama de bloques de la pantalla de selección de la forma de onda.

La funcionalidad principal se basa en una estructura controlada por eventos que responde a las interacciones del usuario. El menú principal presenta seis botones: "Escalón", "Rampa", "Cíclica", "Onda cuadrada", "Pulso diferencial" y una flecha para regresar a la página anterior. Cada botón activa un caso específico en la estructura de eventos, redirigiendo al subprograma correspondiente o al menú inicial mediante el SubVI "Salto Pag".

El programa opera dentro de un bucle while, asegurando su ejecución continua hasta que el usuario lo detenga manualmente con el botón de parada ("Salir" en el panel frontal).



### 4.2.4 Configuración del experimento, ejecución y registro de valores

En este apartado se presenta una explicación general de los VIs diseñados para ejecutar los experimentos asociados a cada forma de onda. Todos ellos comparten una estructura común.

En términos generales, estos programas permiten registrar los datos del experimento y configurar las características de las formas de onda. Una vez finalizada la configuración, el usuario puede iniciar el experimento sobre la celda pulsando un botón en el mismo VI. Además, durante el experimento, el programa muestra en tiempo real información relevante, como el voltaje aplicado, el porcentaje de progreso y entre otros parámetros.

Aunque la programación de las formas de onda sigue una estructura unificada, la generación específica de cada tipo de onda es más compleja y se gestiona mediante VIs individuales diseñados para cada caso particular. Por este motivo, la explicación de cada una de estas formas de onda se desarrolla en el apartado *4.2.5 Generación de las formas de onda*.

### ● INTERFAZ DE USUARIO

El programa principal permite al usuario ingresar los datos necesarios para llevar a cabo el experimento. Estos datos incluyen:

- **Archivo de salida:** Nombre y directorio donde se almacenarán los datos generados durante el experimento.
- **Información del electrodo del cátodo:** Tipo de electrodo, área, y especificación de si se trata del electrodo de trabajo.
- **Información del electrodo del ánodo:** Los mismos datos que para el cátodo: tipo de electrodo, área, y si corresponde al electrodo de trabajo.
- **Datos adicionales (opcional):** En caso necesario, se puede incluir información como el tipo y la cantidad de levadura utilizada, la cantidad de celulosa empleada, entre otros detalles específicos del experimento.
- **Configuración de la forma de onda:** En esta sección, el usuario introduce los parámetros necesarios según la forma que desea realizar. Los valores requeridos varían en función de la forma seleccionada. Dado que la configuración para las formas de onda cíclica, cuadrada y de pulso diferencial no se basa en tiempo sino en ciertos parámetros como

diferencias de voltaje, amplitud o período, se ha incluido un marcador de tiempo que se calculará a partir de los parámetros introducidos. Para el caso de la onda cíclica, este tiempo será el tiempo total de duración de la onda, mientras que, en la onda cuadrada y la de pulso diferencial, corresponderá al intervalo en el que el voltaje varía, formando la respectiva onda, una vez transcurrido ese tiempo, el voltaje permanecerá constante en un valor definido por el usuario hasta alcanzar el tiempo final establecido.

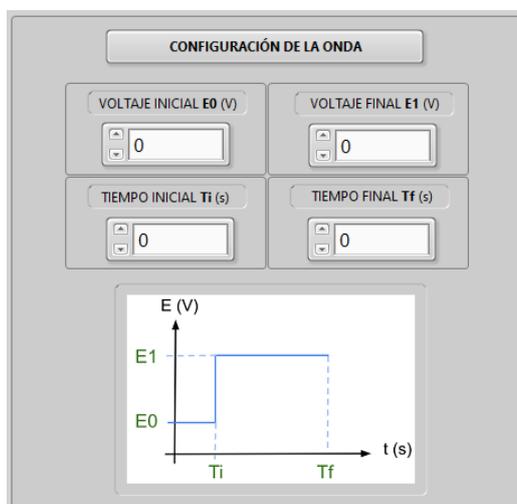


Ilustración 42. Configuración de parámetros de la onda escalón.

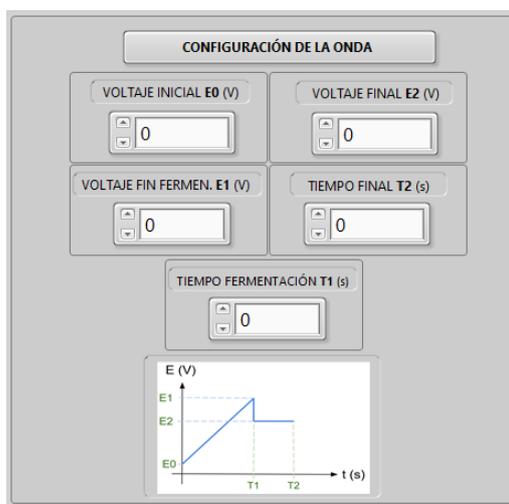


Ilustración 43. Configuración de parámetros de la onda rampa.

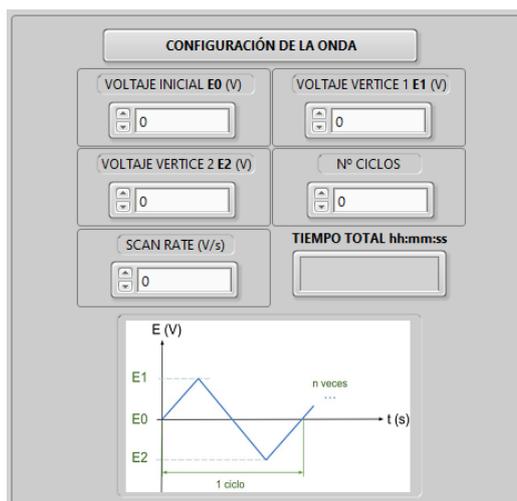


Ilustración 41. Configuración de parámetros de la onda cíclica.

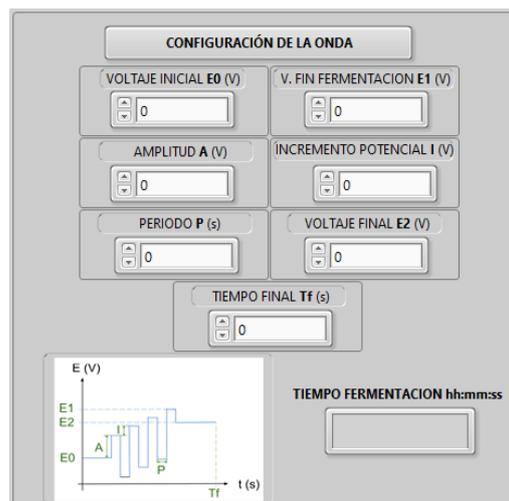


Ilustración 40. Configuración de parámetros de la onda cuadrada.

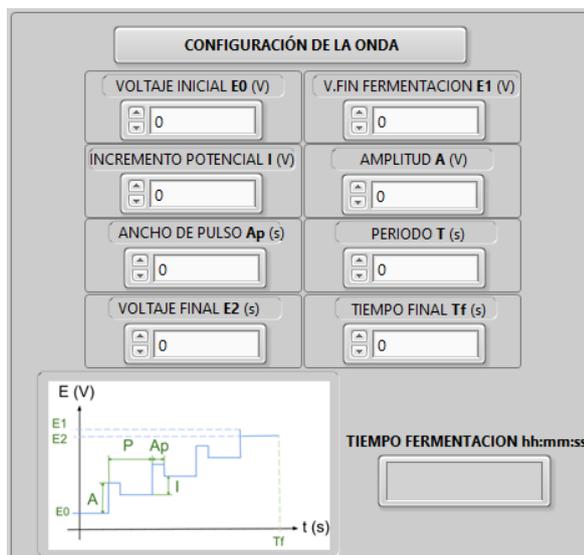


Ilustración 44. Configuración de parámetros de la onda de pulso diferencial.

Después de ingresar los datos necesarios en la sección superior, el programa comenzará a generar la forma de onda con los valores introducidos cuando el usuario pulse el botón "Comenzar experimento". En ese momento, en la sección inferior del programa, se visualizará la forma de onda generada sobre la celda, junto con el porcentaje del experimento completado, permitiendo al usuario estimar el tiempo restante. Además, se mostrará en tiempo real el consumo de intensidad del sistema. En la parte inferior derecha, el usuario tendrá la opción de registrar el tiempo y las concentraciones medidas de las muestras tomadas durante el experimento. Si fuera necesario, el usuario podrá finalizar el experimento antes de que la forma de onda configurada concluya, mediante el botón "Finalizar experimento". Esto garantiza la correcta salvaguarda de los datos recogidos durante el ensayo.

A continuación, se presenta la pantalla completa que el usuario visualizará antes de iniciar el experimento en el caso de que desee realizar un experimento con la forma de onda de pulso diferencial:



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO

Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación



**FORMA DE ONDA: PULSO DIFERENCIAL** ✖ Salir

**ALMACENAMIENTO DE DATOS**  
Introduzca el nombre del archivo y la carpeta donde quiere que guarden los archivos  
**Nombre del archivo**   
**Carpeta**

**INFORMACIÓN ADICIONAL**  
Introduzca si desea algún comentario referente al experimento si lo considera necesario

**ELECTRODO CÁTODO**  
Tipo del electrodo usado en el cátodo  
  
Activar si este es el electrodo de trabajo   
Área del electrodo cm<sup>2</sup>

**ELECTRODO ÁNODO**  
Tipo del electrodo usado en el ánodo  
  
Activar si este es el electrodo de trabajo   
Área del electrodo cm<sup>2</sup>

**CONFIGURACIÓN DE LA ONDA**

**VOLTAJE INICIAL E0 (V)**   
**INCREMENTO POTENCIAL I (V)**   
**ANCHO DE PULSO Ap (s)**   
**VOLTAJE FINAL E2 (s)**

**V.FIN FERMENTACION E1 (V)**   
**AMPLITUD A (V)**   
**PERIODO T (s)**   
**TIEMPO FINAL Tf (s)**

**TIEMPO FERMENTACION hh:mm:ss**

COMENZAR EXPERIMENTO FINALIZAR EXPERIMENTO

**GRÁFICA VOLTAJE (V) - TIEMPO (s)**  
 V  S Plot 0

**PORCENTAJE DEL EXPERIMENTO REALIZADO**  

%

**CONSUMO AMPERIOS (A) - TIEMPO (s)**

**CONSUMO**  A

**CONCENTRACIONES MEDIDAS**

Tiempo 1	Concentracion 1	Tiempo 4	Concentracion 4	Tiempo 7	Concentracion 7
<input type="text" value="0"/>					
Tiempo 2	Concentracion 2	Tiempo 5	Concentracion 5	Tiempo 8	Concentracion 8
<input type="text" value="0"/>					
Tiempo 3	Concentracion 3	Tiempo 6	Concentracion 6	Tiempo 9	Concentracion 9
<input type="text" value="0"/>					

Ilustración 45. Panel frontal Pulso Diferencial.

## DIAGRAMA DE BLOQUES

En este apartado se describe la programación necesaria para implementar esta funcionalidad. A continuación, se presenta un fragmento del diagrama de bloques:

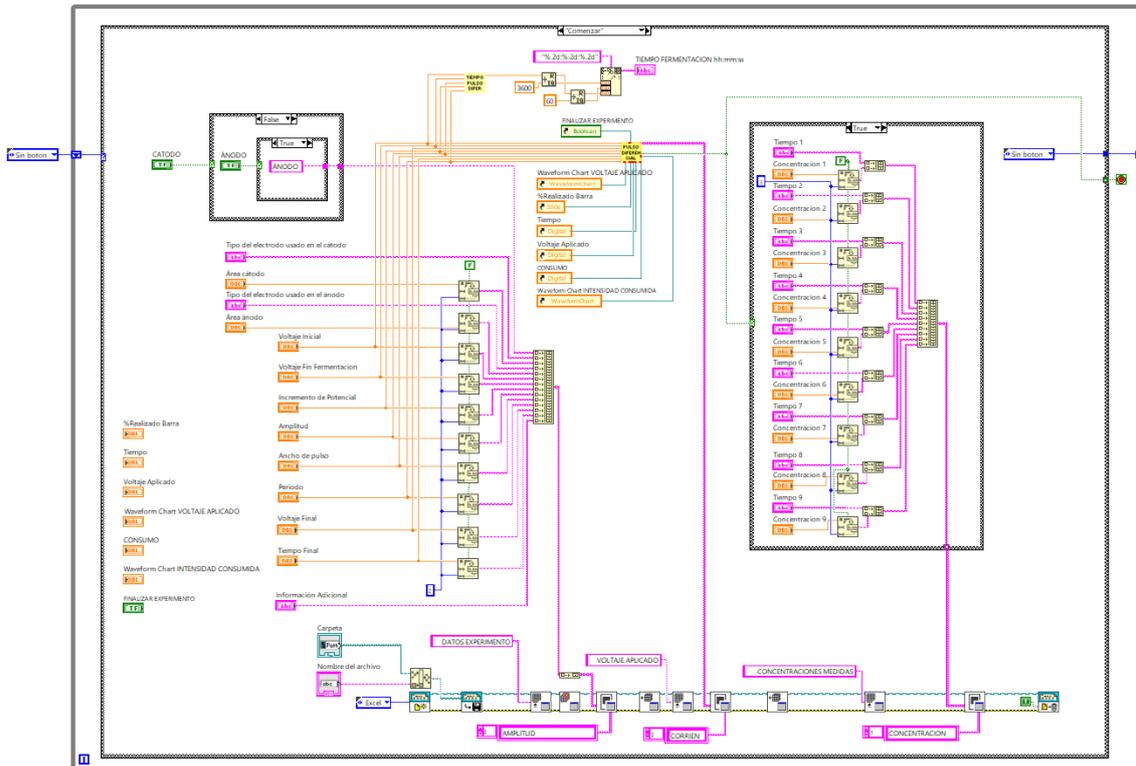


Ilustración 46. Sección del diagrama de bloques de la forma de onda Pulso Diferencial

Seguidamente, se analizarán las secciones más relevantes, excluyendo los SubVI encargados de generar las formas de onda para cada tipo y aquellos que calculan el tiempo de ejecución según los parámetros ingresados para cada forma de onda. Tal como se mencionó antes, estos aspectos se abordarán en el siguiente apartado.

## ➔ REGISTRO DE DATOS:

En esta sección del programa, se gestionan los parámetros de entrada necesarios para configurar el experimento y almacenar la información en un archivo Excel. Los controles de entrada permiten al usuario introducir datos como el tipo de electrodo utilizado en el ánodo y el cátodo, las áreas de los electrodos y los parámetros específicos de la onda.

Todos estos valores se organizan en un array para su posterior registro en un archivo Excel. Además, los datos introducidos se utilizan para configurar la forma de onda mediante el subVI correspondiente. Asimismo, estos valores se envían al subVI denominado "Tiempo Pulso Diferencial" (u otro equivalente según el tipo de onda).

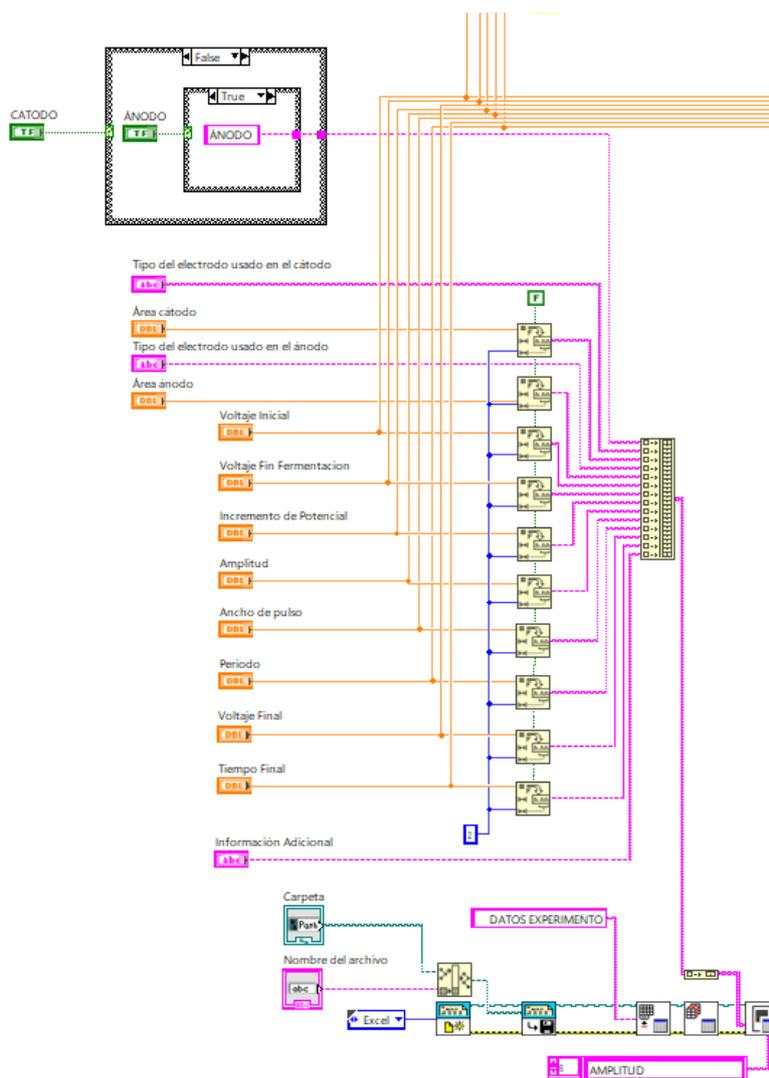


Ilustración 47. Sección del programa donde se realiza registro de datos y de parámetros del experimento.

### ➔ TIEMPO EJECUCIÓN ONDA:

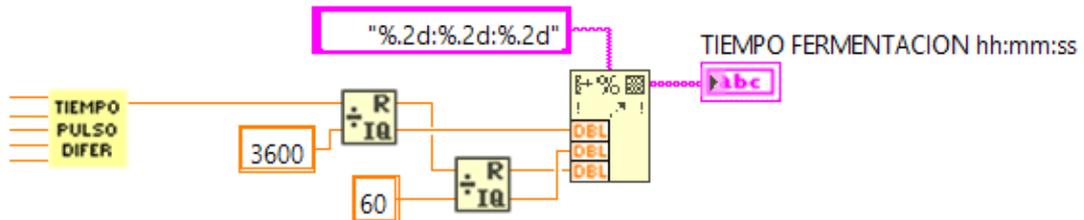


Ilustración 48. Sección del programa que calcula el tiempo de duración de la onda en hh:mm:ss

El objetivo de este fragmento del VI es proporcionar información al usuario del tiempo que se va a estar ejecutando la variación de voltaje en aquellas formas de onda en las que los parámetros de configuración no incluyan un parámetro de tiempo para marcar el fin de la ejecución, si no que la forma de onda se configure por otros parámetros como número de ciclos, voltaje final, amplitud, etc. Este valor se obtiene a partir de un subVI adaptado a cada tipo de onda y convierte dicho tiempo al formato estándar hh:mm:ss (horas, minutos y segundos).

En este caso, el subVI se denomina "*Tiempo Pulso Diferencial*", y devuelve el tiempo total en segundos en función de los parámetros característicos de la onda de pulso diferencial.

Este tiempo se procesa para descomponerlo en horas, minutos y segundos. Primero, se divide entre 3600 (número de segundos en una hora) para calcular las horas completas, tomando únicamente la parte entera del resultado. El resto de esta división, que representa los segundos que no completan una hora, se calcula mediante un bloque de módulo (rem) y se utiliza para determinar los minutos. Este valor restante se divide entre 60 (número de segundos en un minuto), y nuevamente se toma la parte entera para obtener los minutos completos. El resto final de esta operación corresponde directamente a los segundos restantes. Una vez calculados los valores de horas, minutos y segundos, estos se formatean en un string utilizando el bloque de formato de texto ("%2d:%2d:%2d"), que asegura que cada valor se presente en dos dígitos separados por dos puntos, siguiendo el estándar hh:mm:ss. Finalmente, el string resultante se muestra en un indicador etiquetado en este caso como "*TIEMPO FERMENTACIÓN hh:mm:ss*", lo que permite al usuario visualizar de manera comprensible la duración total del experimento.



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO



Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

### ➔ REFERENCIA DE DATOS:

El subVI encargado de generar la forma de onda (“*Pulso Diferencial*” en este caso) desempeña un papel central en la ejecución del programa. Además de recibir los valores necesarios para configurar la señal, este subVI también recibe referencias directas al programa principal. Estas referencias, mostradas en la ilustración 49, incluyen controles como el botón de “*Finalizar Experimento*” o indicadores, entre los que se encuentran la gráfica del Voltaje Aplicado, el porcentaje realizado del experimento, el voltaje o el tiempo transcurrido. Además de los indicadores de Consumo y la gráfica de Intensidad Consumida, que muestran valores actualizados en tiempo real basados en las lecturas del sistema.

Este subVI, es el programa ejecutado de manera constante en el programa, por lo que se utilizan estas referencias para garantizar que tanto los valores generados (voltaje aplicado) como los valores leídos (intensidad consumida) se reflejen y actualicen continuamente en el programa principal. Esto asegura que las gráficas y los indicadores del programa principal representen en todo momento el estado actual de la señal y las mediciones del sistema, proporcionando al usuario una visualización en tiempo real de estos parámetros.

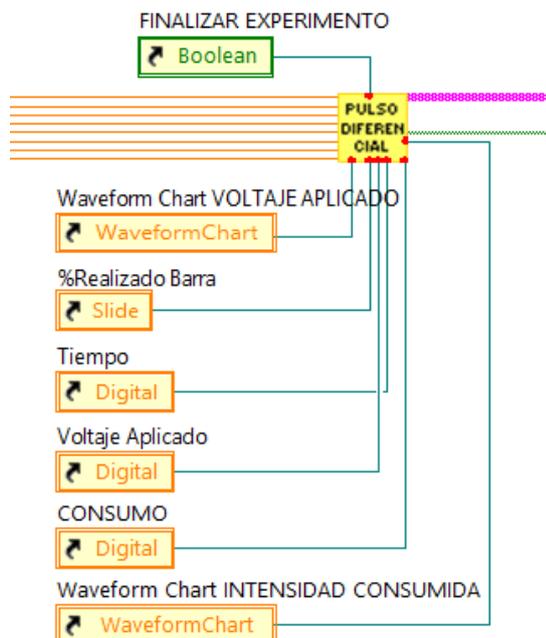


Ilustración 49. Sección del programa en la que se envían referencias del programa principal al subVI encargado de la generación de la forma de onda.

## TIEMPOS Y CONCENTRACIONES:

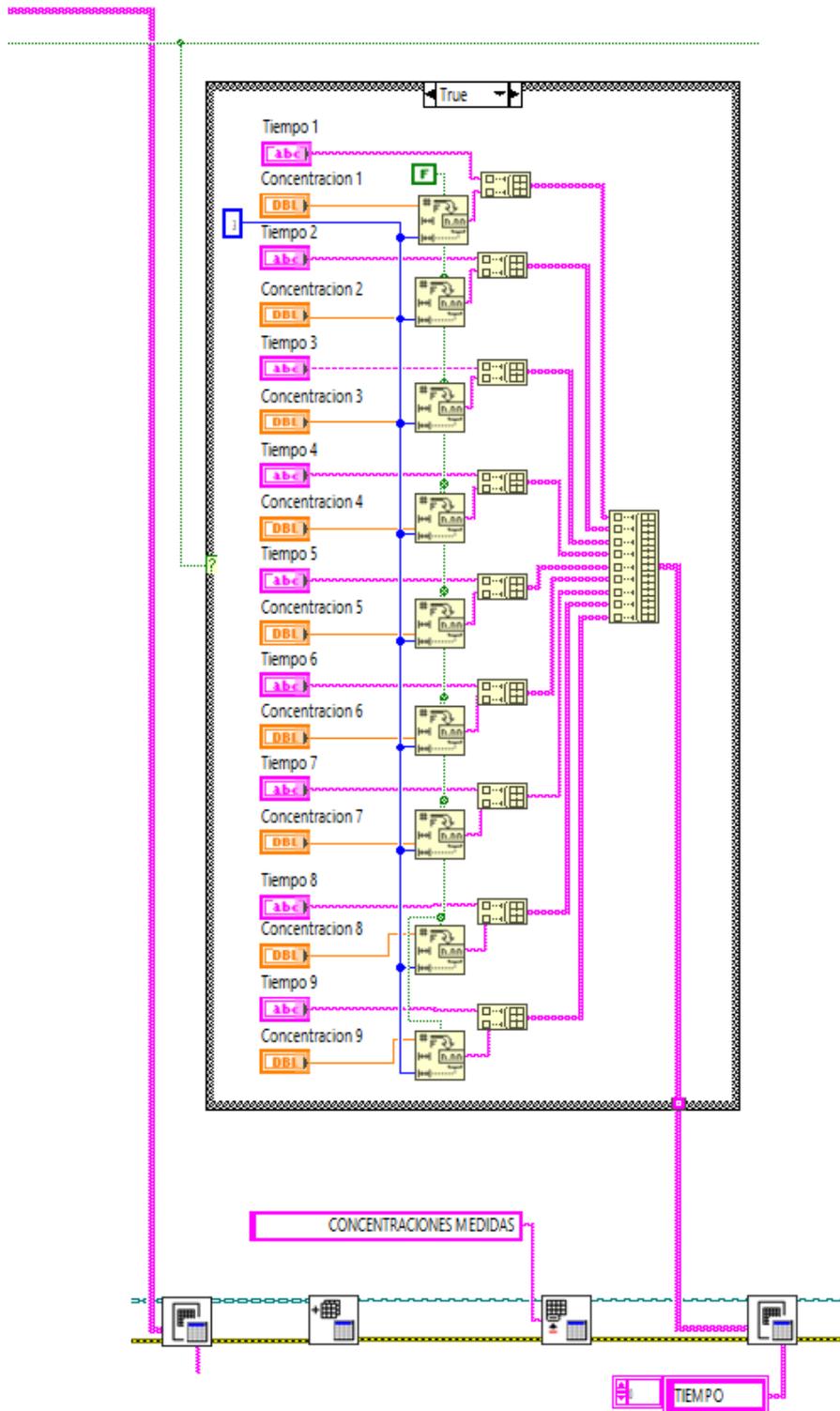


Ilustración 50. Sección del programa destinada a ingresar el tiempo en que se tomaron muestras del cultivo de fermentación, así como la concentración medida en cada caso.



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO

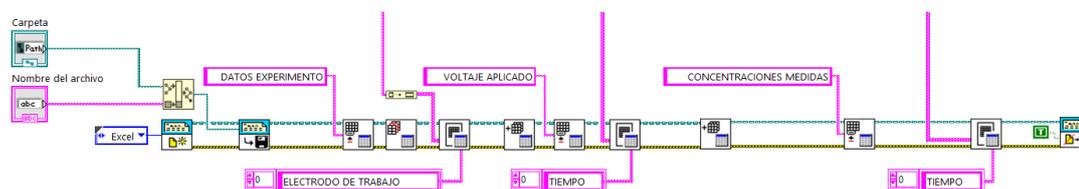


*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*

Esta sección del programa permite al usuario registrar los tiempos y las concentraciones correspondientes a las muestras tomadas durante un experimento, y al finalizar el proceso, exportar estos datos automáticamente a un archivo Excel. En primer lugar, el programa cuenta con controles etiquetados como "Tiempo" y "Concentración", donde el usuario puede ingresar manualmente los valores correspondientes a cada muestra. Estos controles permiten registrar los datos según el avance del experimento.

Cuando el subVI encargado de calcular la onda de voltaje generada finaliza su ejecución, envía una señal lógica verdadera (True) que activa la estructura condicional en esta sección del programa. Dentro de esta estructura, los datos de tiempo y concentración ingresados por el usuario se organizan en dos arrays separados: uno para los tiempos y otro para las concentraciones. Para posteriormente poder hacer la exportación de esta información al archivo excel definido.

### ➔ EXPORTACIÓN A EXCEL DE LOS RESULTADOS:



*Ilustración 51. Sección del diagrama de bloques de la forma de onda Rampa para la exportación a Excel de los datos del experimento.*

Este segmento del programa en LabVIEW se encarga de registrar los datos del experimento en un archivo Excel, organizándolos en diferentes hojas según el tipo de información. En primer lugar, se utiliza un bloque de selección de ruta que permite al usuario elegir la carpeta donde se guardará el archivo. A continuación, un control de texto denominado "Nombre del archivo" permite asignar el nombre al archivo Excel, que se combina con la ruta seleccionada para generar la dirección completa del archivo.

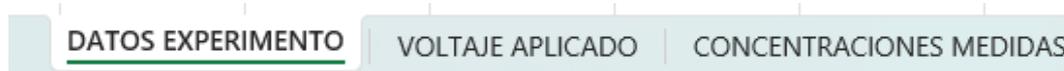
El bloque de Excel (representado con un ícono azul y el logo de Excel) se encarga de abrir o crear el archivo en la ubicación especificada. Este bloque inicializa la comunicación con Excel y prepara el archivo para recibir los datos. Posteriormente, los datos del experimento se dividen en tres secciones principales, como se muestra en la siguiente imagen, cada una de las cuales se escribe en una hoja independiente del archivo Excel.



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO



*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



*Ilustración 52. Denominación de las hojas exportadas a Excel en cada experimento realizado.*

En la primera hoja se registran los datos generales del experimento introducidos por el usuario. Estos datos se organizan en formato tabular y se envían a la hoja correspondiente mediante funciones de escritura en Excel.

La segunda hoja está dedicada a almacenar los valores de voltaje aplicado e intensidad medida durante el experimento, junto con el tiempo en segundos correspondiente. Estos datos se obtienen de las señales procesadas en el programa específico para cada tipo de onda. Los bloques encargados del manejo de datos tabulares garantizan que los valores de voltaje, intensidad y tiempo se almacenen de manera ordenada en filas y columnas, simplificando el análisis y procesamiento posterior por parte del usuario.

En la tercera hoja se registran los tiempos de medición y las concentraciones obtenidas durante el experimento, en caso de que se haya registrado alguno. Se organizan en una tabla y se escriben en la hoja destinada a este propósito.

Finalmente, una vez registrados todos los datos, el programa cierra la conexión con el archivo Excel, asegurando que la información se guarde correctamente. Este diseño permite generar un archivo estructurado, en el cual se recogen en hojas separadas los parámetros generales, los datos de voltaje e intensidad, y las concentraciones medidas, con el fin de facilitar el análisis posterior de los resultados experimentales obtenidos.

## 4.2.5 Generación de las formas de onda

En el siguiente apartado, se explicará cómo se generan los cinco tipos de formas de onda. Además, se abordará también el cálculo del tiempo de ejecución de las ondas en las que sea necesario.

ESCALÓN:

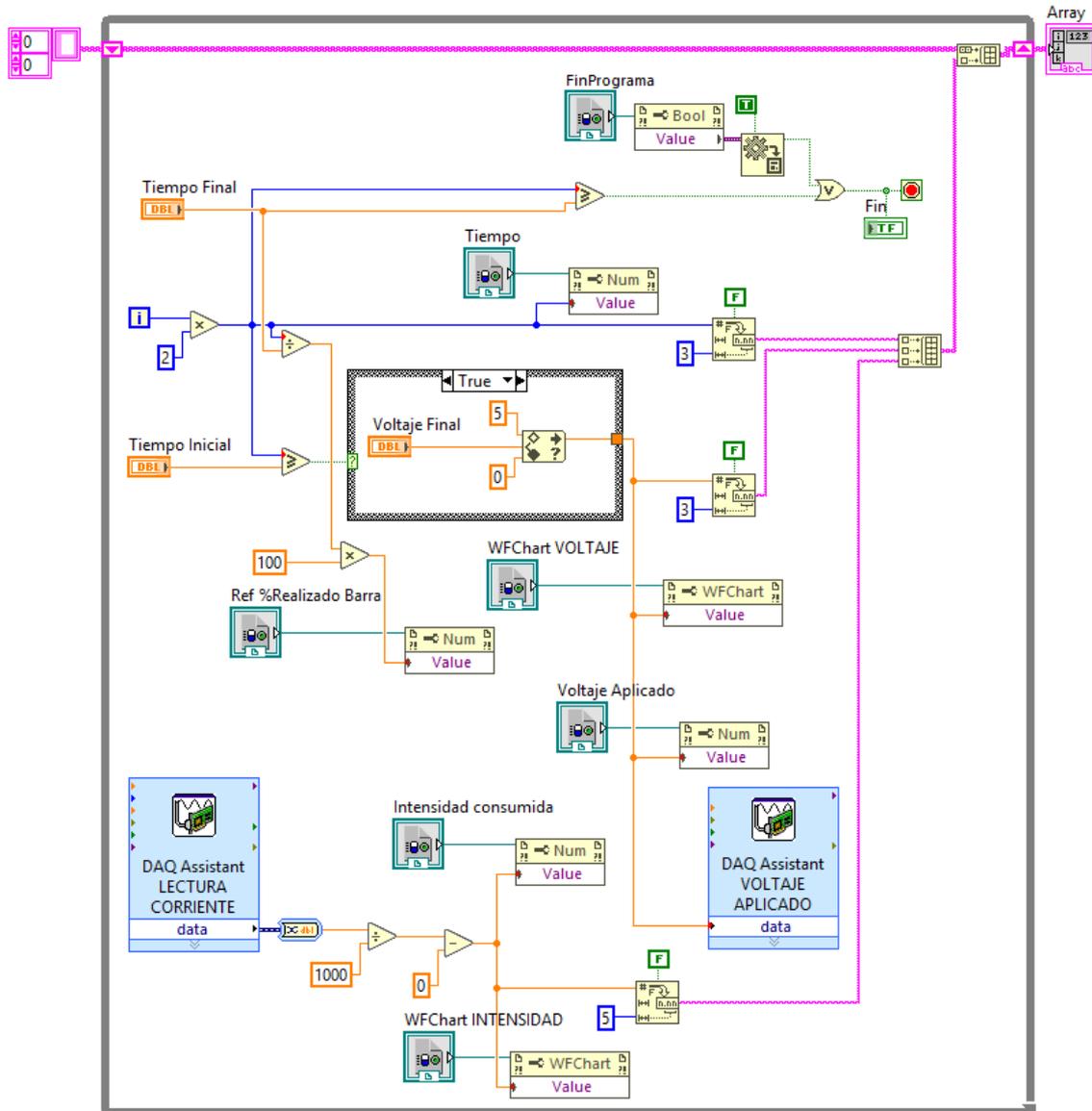


Ilustración 53. Sección del subVI que genera la forma de onda de tipo Escalón.

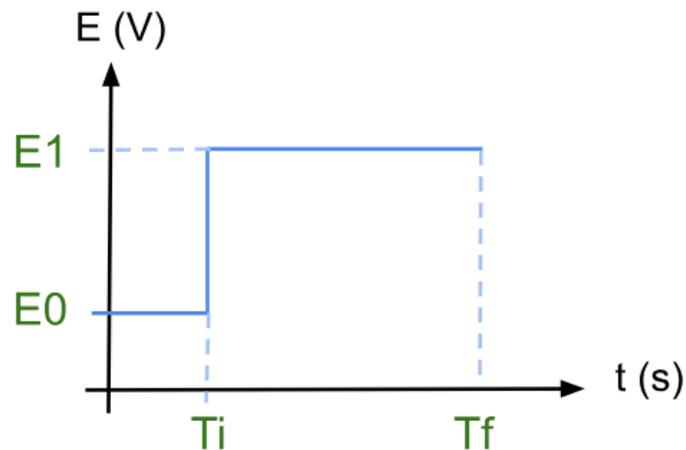


## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



El subVI de la ilustración 53 ha sido diseñado para generar una onda en forma de escalón. Los parámetros de configuración, presentados en la ilustración 54, incluyen: Tiempo Inicial ( $T_i$ ), Voltaje Inicial ( $E_0$ ), Tiempo Final ( $T_f$ ) y Voltaje Final ( $E_1$ ). Estos determinan cómo se comporta el VI durante su ejecución.



*Ilustración 54. Gráfica Onda Escalón*

El diagrama de bloques funciona de tal forma que, antes de alcanzar el Tiempo Inicial, el voltaje se mantiene constante en el valor del Voltaje Inicial. Una vez que el tiempo de ejecución supera o iguala el Tiempo Inicial, el programa cambia al Voltaje Final, manteniéndolo hasta alcanzar el Tiempo Final, momento en el que el programa se detiene automáticamente y manda al programa principal una señal para comunicar que ha finalizado.

El control de esta lógica se implementa principalmente mediante una estructura condicional denominada en LabVIEW Case Structure. Inicialmente, la estructura está en el caso *False*, aplicando el Voltaje Inicial. Cuando el tiempo de ejecución supera el Tiempo Inicial, la estructura cambia al caso *True*, aplicando el Voltaje Final.

El VI tiene como salida un array que registra en tiempo real los valores de tiempo, voltaje aplicado y consumo correspondiente para cada instante. Este array será el que se exporte posteriormente a un archivo Excel. Asimismo, el VI utiliza referencias comunicadas desde el programa principal para actualizar en tiempo real las gráficas e indicadores correspondientes, asegurando que el programa principal refleje los valores de voltaje aplicado e intensidad consumida de forma continua y sincronizada.

El programa puede finalizar bien a partir de la señal de que se ha finalizado la ejecución de la onda, como se indicó previamente, o a través de la referencia de la señal enviada al presionar el botón “*Finalizar experimento*” en el programa principal. Este funcionamiento se aplica a todas las formas de onda.

Cabe destacar el empleo del bloque DAQ Assistant, una herramienta de LabVIEW utilizada para el suministro del voltaje generado al circuito y para la lectura de los valores de intensidad:



*Ilustración 55. DAQ Assistant para suministrar el voltaje generado.*



*Ilustración 56. DAQ Assistant para realizar la lectura de los valores de intensidad.*

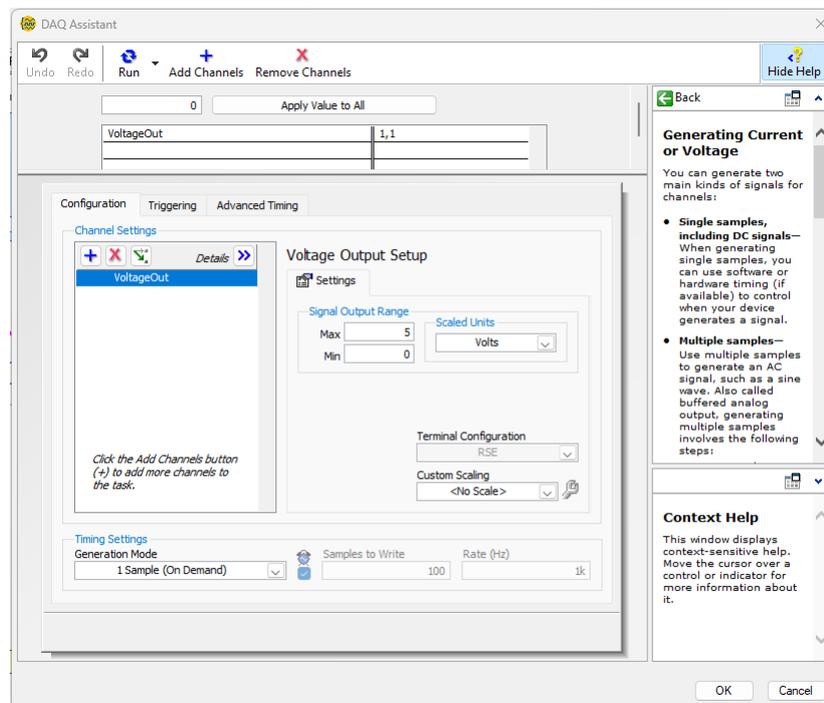
El DAQ Assistant de LabVIEW es una herramienta configurable que facilita la interacción con dispositivos de adquisición de datos. Este bloque permite configurar, implementar y ejecutar tareas de adquisición o generación de señales en dispositivos de hardware compatibles con NI-DAQmx, como tarjetas de adquisición de datos. Su propósito es simplificar la configuración de tareas de hardware sin necesidad de programar manualmente cada detalle, ofreciendo una interfaz gráfica intuitiva que guía al usuario en la definición de los parámetros clave necesarios [29].

Para configurar el bloque DAQ Assistant, se coloca éste en el diagrama de bloques desde la categoría Measurement I/O de la paleta de funciones. Al añadirlo al diagrama de bloques del programa, se abre automáticamente su asistente de configuración, donde el usuario selecciona el tipo de tarea que desea realizar. Puede elegir entre la adquisición de señal analógica, la generación de señal analógica o la lectura y escritura de señales digitales. Después, se elige el canal o puerto del dispositivo DAQ conectado y se definen parámetros como el rango de voltaje, la frecuencia de muestreo, el número de muestras a leer y el modo de adquisición, que puede ser continuo o por lotes. Una vez completada la configuración, el DAQ Assistant genera un bloque que se integra fácilmente con el resto del diagrama de bloques.

Entre sus principales ventajas se encuentran su facilidad de uso, ya que permite a los usuarios trabajar con hardware DAQ sin necesidad de conocimientos avanzados sobre la API de NI-DAQmx. Además, su interfaz gráfica simplifica la configuración de tareas sin necesidad de escribir código. Sin embargo, presenta algunas limitaciones, como un rendimiento menos eficiente en aplicaciones de alta velocidad o funcionalidades más restringidas en comparación con la programación directa mediante funciones avanzadas de NI-DAQmx.

Dado que los experimentos que realizamos tienen una duración cercana a 24 horas, no se requiere una precisión excesiva ni una alta velocidad de ejecución, lo que mitiga las posibles desventajas de rendimiento. No obstante, será necesario ajustar tanto la frecuencia de muestreo como el número de muestras para evitar la saturación de datos durante el proceso.

En las ilustraciones 57 y 58 se muestra la configuración de los bloques DAQ Assistant utilizados para la adquisición y generación de datos durante los ensayos. En el DAQ Assistant de lectura, el número de muestras a leer por ciclo se ha establecido en 1, mientras que la frecuencia de muestreo se ha fijado en 2 Hz, logrando un equilibrio entre la precisión y la captura de datos, y evitando la saturación del sistema. Con esta configuración, cada bucle se ejecutará cada 2 segundos, momento en el cual se registrará un nuevo valor de voltaje y se realizará una nueva medición de corriente.



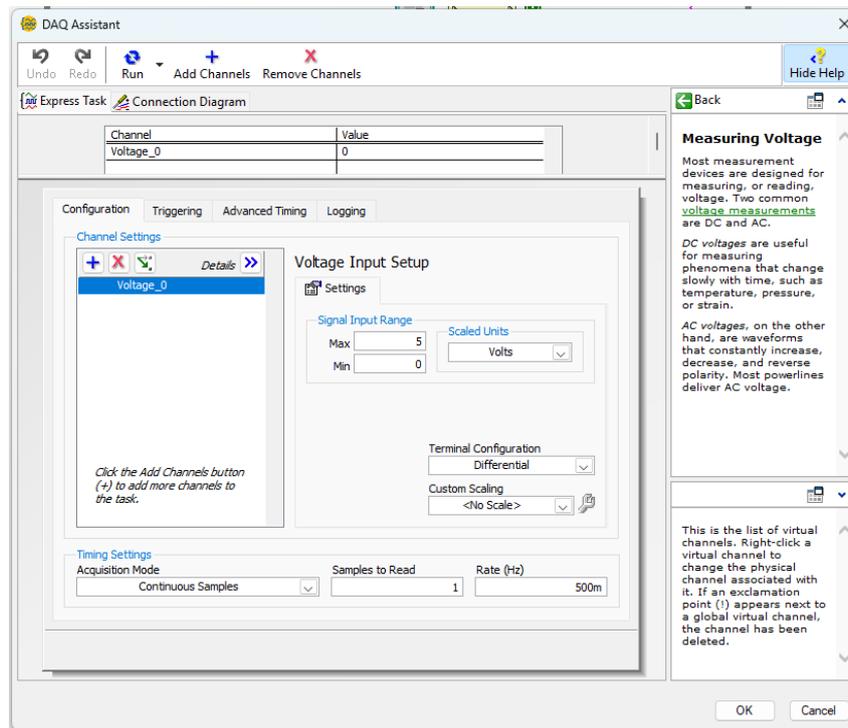
*Ilustración 57. Configuración de parámetros bloque DAQ Assistant Voltaje aplicado.*



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO



*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



*Ilustración 58. Configuración de parámetros bloque DAQ Assistant Lectura de Corriente.*



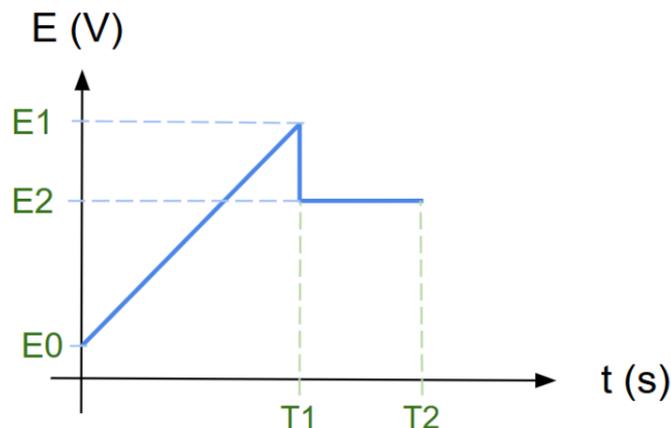


Ilustración 60. Gráfica Onda Rampa

El voltaje inicial representa el punto de partida de la rampa, mientras que el voltaje de fin de fermentación es el límite máximo que la rampa debe alcanzar, coincidiendo con el tiempo de fin de fermentación. Estos parámetros permiten calcular la velocidad de barrido, definida como la variación del voltaje por unidad de tiempo (V/s).

Durante la ejecución, el subVI utiliza un bucle para calcular el voltaje aplicado. Este se obtiene sumando al voltaje inicial un incremento igual al producto de la velocidad de barrido por el tiempo transcurrido en segundos. Este ciclo se repite hasta que el tiempo de ejecución supera el tiempo de fin de fermentación, momento en el cual el programa avanza a la siguiente etapa.

En la segunda y última etapa, el subVI aplica de forma constante el voltaje final hasta que el tiempo de ejecución supere el tiempo final, tras lo cual el programa finalizará su ejecución.

Al igual que en el caso del modo Escalón, el subVI incorpora módulos de adquisición de datos que permiten aplicar el voltaje calculado y medir la corriente consumida en el circuito. Los datos recopilados durante la ejecución se almacenan en un array para su análisis posterior. Todo el flujo de datos se ha diseñado de manera dinámica, con gráficos que se actualizan en tiempo real y un monitoreo continuo del proceso mediante referencias al programa principal.

## ONDA CÍCLICA:

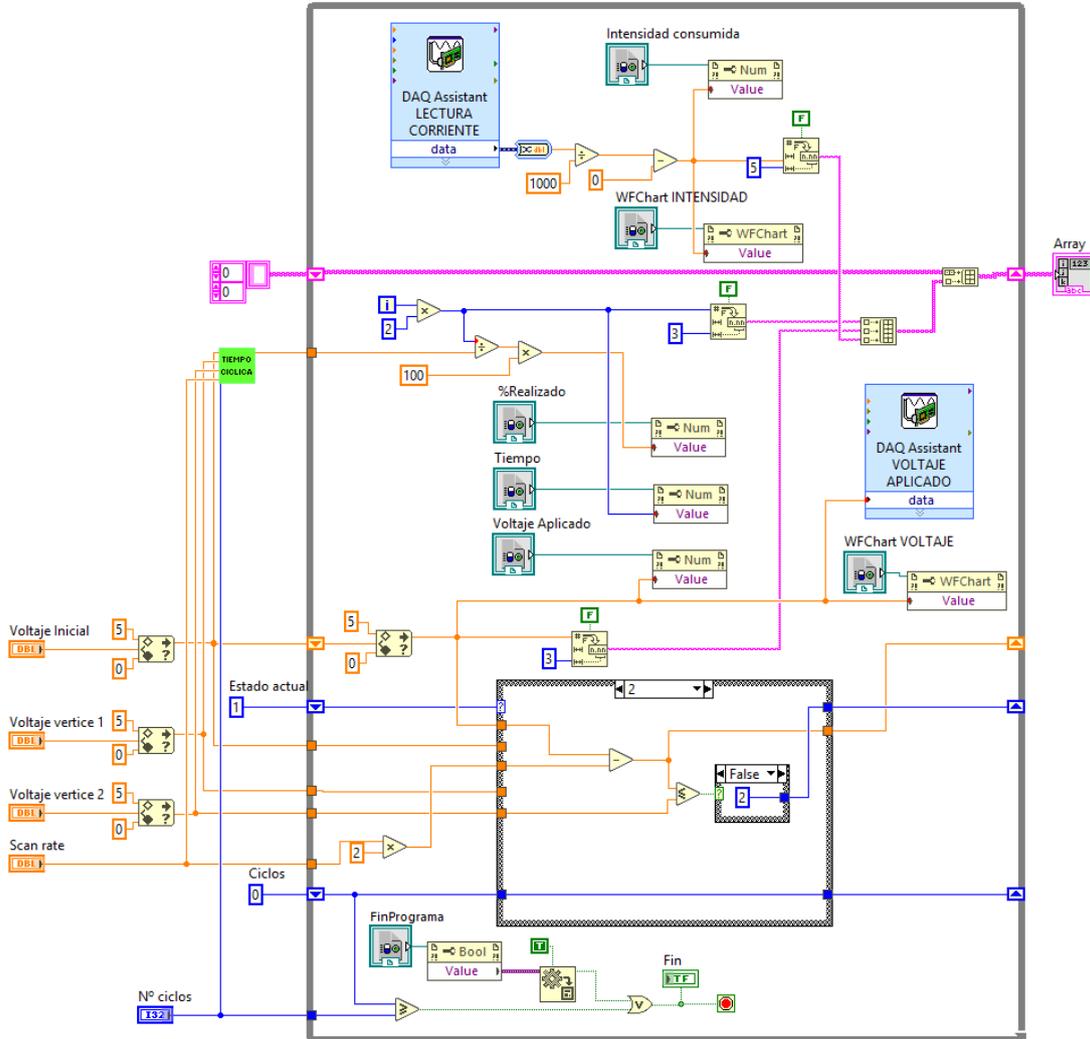


Ilustración 61. Sección del subVI que genera la forma de onda de tipo Cíclica.

Este subVI genera una onda cíclica mediante un ciclo While que se ejecuta de forma continua. Para su configuración es necesario cinco parámetros: Voltaje Inicial (E0), Voltaje del Vértice 1 (E1), Voltaje del Vértice 2 (E2), Velocidad de barrido o Scan Rate y el número de ciclos (n). Estos parámetros se muestran en la siguiente imagen:



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO

Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

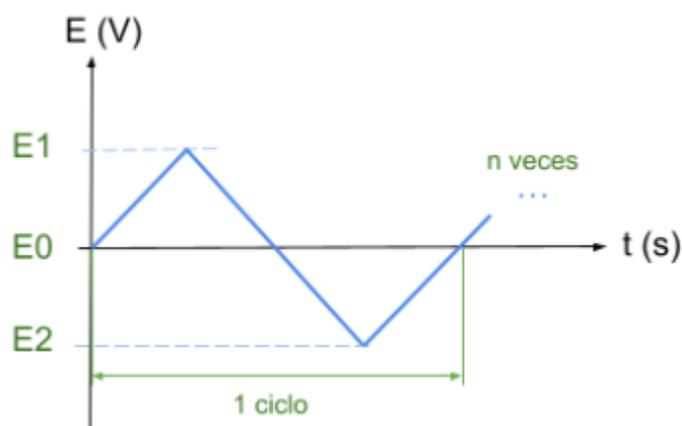


Ilustración 62. Gráfica Onda Cíclica.

Su funcionamiento se organiza en tres estados, controlados mediante una estructura Case Structure. El programa avanza por estos estados de manera secuencial para construir la onda cíclica, hasta que alcanza el número de ciclos especificado por el usuario:

- En el Estado 1, el voltaje comienza con el valor especificado por el usuario como Voltaje Inicial. Durante este estado, el programa aumenta progresivamente el voltaje acumulado sumándole, en cada iteración, el valor del Scan Rate multiplicado por dos ya que el bucle se realiza cada dos segundos. El estado continúa hasta que el voltaje acumulado alcanza o supera el valor del Voltaje Vértice 1. En ese momento, el programa cambia al Estado 2.
- En el Estado 2, al iniciar este estado, el voltaje acumulado tiene el valor que alcanzó al final del Estado 1 (es decir, igual al Voltaje Vértice 1). Durante esta fase, el programa disminuye progresivamente el voltaje acumulado restándole, en cada iteración, el valor del Scan Rate por dos. El estado continúa hasta que el voltaje acumulado alcanza o desciende por debajo del valor del Voltaje Vértice 2. En ese momento, el programa cambia al Estado 3.
- En el Estado 3, el voltaje acumulado comienza en el valor alcanzado al final del Estado 2 (es decir, igual al Voltaje Vértice 2). Durante esta fase, el programa aumenta nuevamente el voltaje acumulado sumándole, en cada iteración, el valor del Scan Rate multiplicado por dos, de manera similar al Estado 1. El estado continúa hasta que el voltaje acumulado alcanza o



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



supera el valor del Voltaje Inicial. En ese momento, el ciclo se completa y el programa regresa al Estado 1, repitiendo el proceso.

El número de ciclos completados se incrementa en uno cada vez que el programa cambia del Estado 3 al Estado 1. Cuando el número de ciclos alcanzados es igual al número de ciclos definido por el usuario, se activa la señal de Fin, y el programa finaliza.

Durante la ejecución, el programa utiliza nuevamente dos bloques DAQ Assistant, uno para aplicar el voltaje calculado en cada iteración y otro para leer la corriente consumida en el circuito, además de enviar los valores necesarios a las referencias del programa principal. El porcentaje de avance del proceso se calcula utilizando una función de tiempo cíclico que veremos a continuación.

### Tiempo:

Este subVI tiene como objetivo calcular el tiempo total de ejecución de una forma de onda cíclica. Para lograr esto, en primer lugar, se determina el tiempo necesario para recorrer cada uno de los tres tramos de la forma de onda.

- En el primer tramo se calcula el tiempo necesario para pasar del voltaje inicial al voltaje vértice 1 usando la fórmula  $T=(A-B) /S$  donde A es el voltaje vértice 1, B es el voltaje inicial, y S es el scan rate.
- En el segundo tramo, se calcula el tiempo para pasar del voltaje vértice 1 al voltaje vértice 2 usando la misma fórmula  $T=(A-B) /S$ , donde A es el voltaje vértice 2 y B es el voltaje vértice 1.
- En el tercer tramo, se calcula el tiempo necesario para regresar del voltaje vértice 2 al voltaje inicial usando nuevamente  $T=(A-B) /S$ , donde A es el voltaje inicial y B es el voltaje vértice 2.

Una vez calculados los tiempos de los tres tramos, estos se suman para determinar la duración de un ciclo completo de la forma de onda. Este valor se multiplica por el número de ciclos ingresado en la entrada para obtener el tiempo total de ejecución del sistema.



## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO



Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

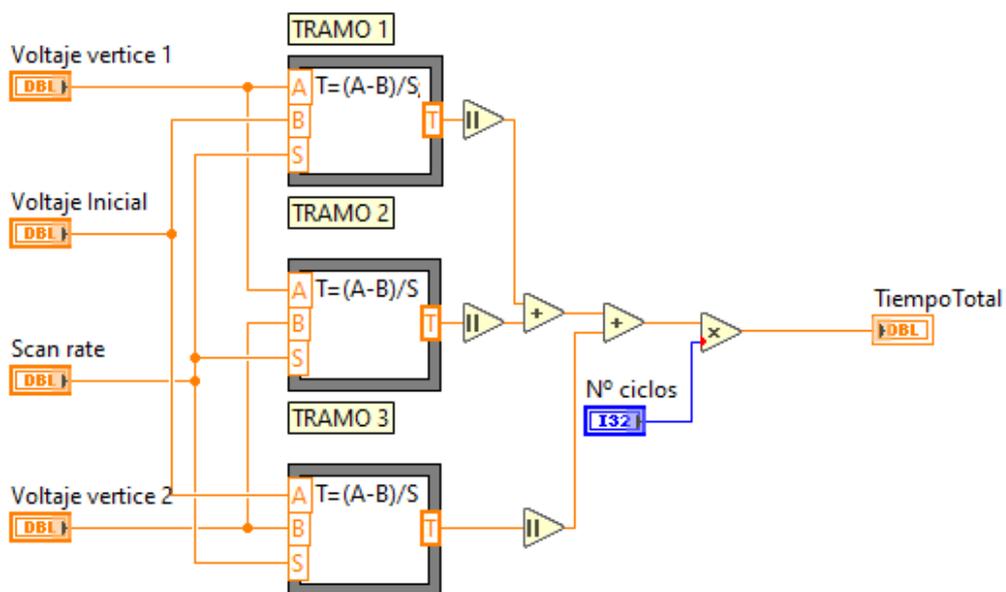


Ilustración 63. VI que calcula el tiempo total de ejecución de la forma de onda Cíclica.

## ONDA CUADRADA:

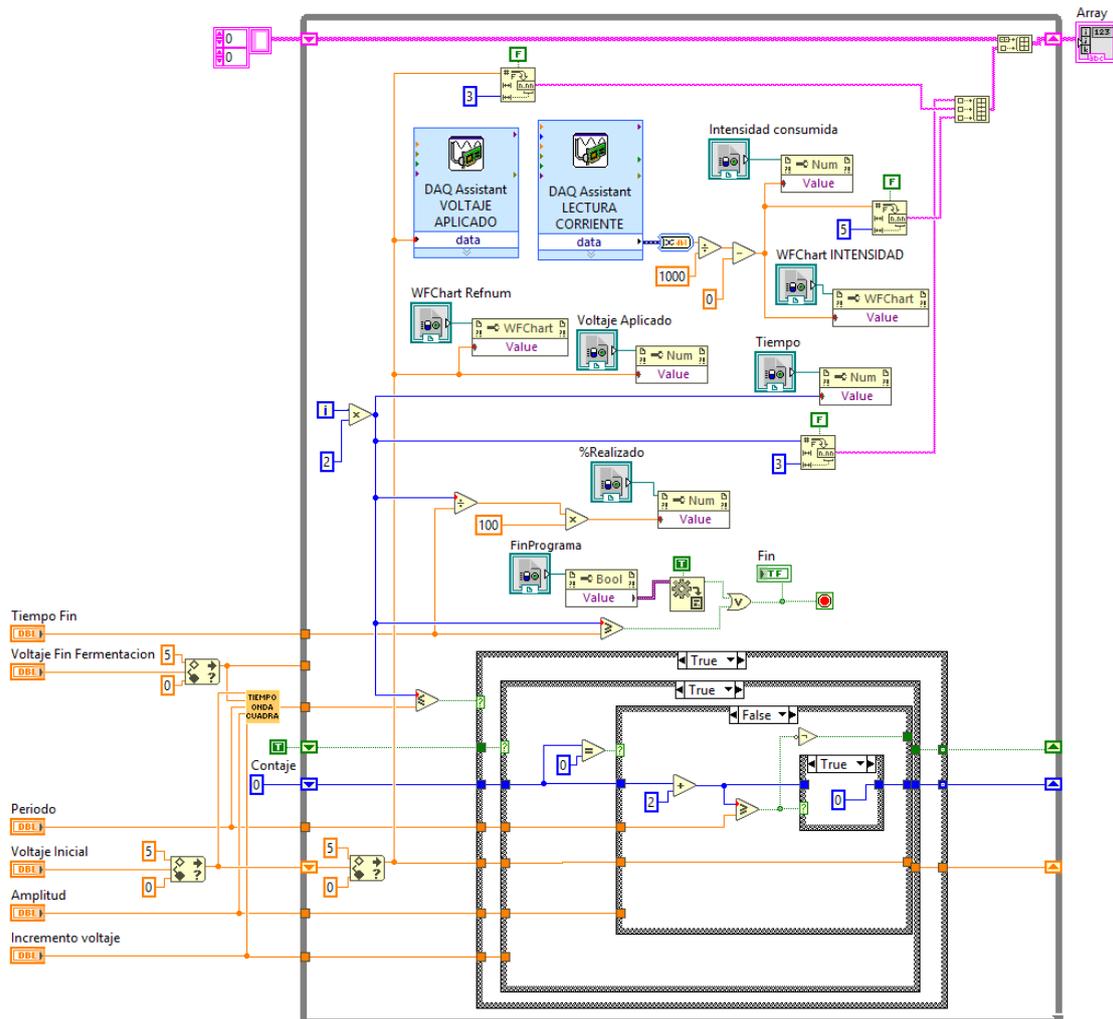


Ilustración 64. Sección del subVI que genera la forma de onda Cuadrada.

Este VI genera una onda cuadrada, según se representa en la ilustración 65. Para su configuración, cuenta con los siguientes parámetros de entrada: Voltaje Inicial (E0), Voltaje Fin de Fermentación (E1), Voltaje Final (E2), Período (P), Amplitud (A), Incremento de Voltaje (I) y Tiempo Final (Tf).

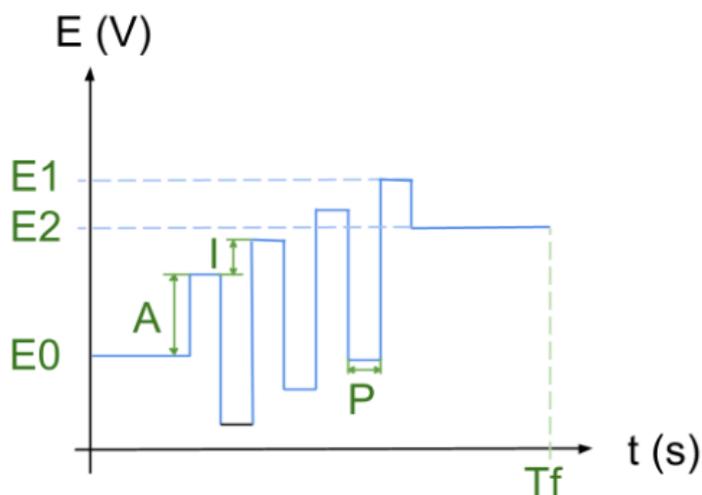


Ilustración 65. Gráfica Onda Cuadrada

En la generación de la onda cuadrada, el voltaje inicial y el de fin de fermentación definen los límites de la señal. La amplitud establece la diferencia entre los niveles alto y bajo de cada ciclo, mientras que el incremento de voltaje determina la variación de voltaje entre ciclos consecutivos. Una vez que la onda alcance el voltaje de fin de fermentación, el programa aplicará el voltaje final hasta que el tiempo de ejecución supere el tiempo establecido como final.

La lógica principal del programa se encuentra en un Case Structure ubicado en la parte inferior del diagrama. Este bloque controla la generación de la onda cuadrada utilizando un contador que registra el número de ciclos realizados, lo éste permite determinar cuándo ajustar el voltaje. El tiempo necesario para alternar el voltaje coincide con el período de la onda definido por el usuario, de esta forma, cuando el contador alcanza un valor igual a al periodo, el programa cambia el voltaje aplicado.

En el caso True del Case Structure, el programa ajusta el voltaje dependiendo de si la onda está en su fase de subida o bajada. Si está subiendo, incrementa el voltaje según lo definido por el parámetro Amplitud hasta alcanzar el nivel superior. Si está bajando, decreta el voltaje hasta alcanzar el nivel inferior. Una vez finalizado el ciclo de subida o bajada, el contador se reinicia para preparar la siguiente iteración.

En el caso False, el programa mantiene el voltaje constante sin realizar ajustes, hasta que el contador indique que es momento de alternar. Cuando se detecta que se ha completado un ciclo, el programa también suma el incremento de voltaje para preparar la siguiente fase.



## PULSO DIFERENCIAL:

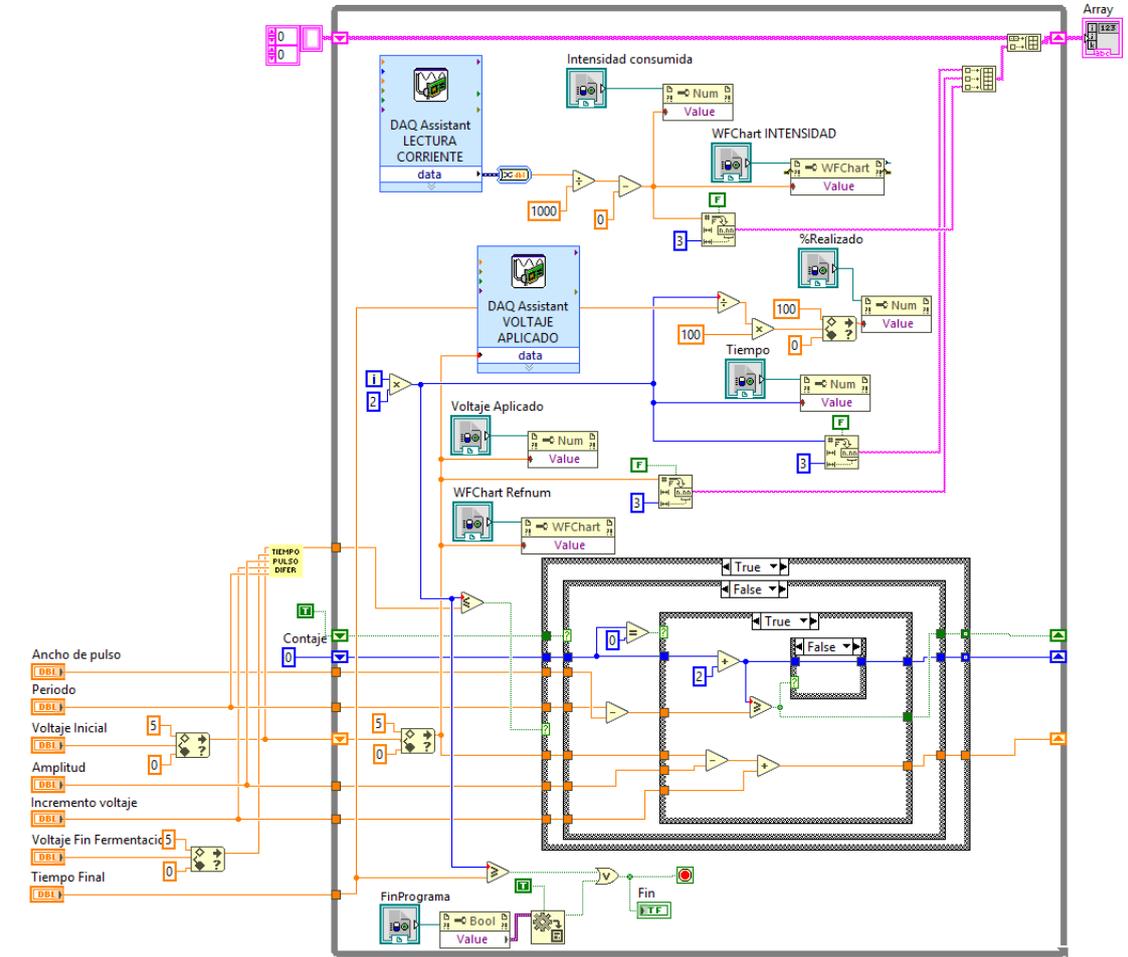


Ilustración 67. Sección del subVI que genera la forma de onda de Pulso Diferencial.

En la ilustración 68 se presentan los parámetros necesarios para definir la onda: Voltaje Inicial ( $E_0$ ), Voltaje Fin Fermentación ( $E_1$ ), Voltaje Final ( $E_2$ ), Amplitud ( $A$ ), Periodo ( $P$ ), Ancho de Pulso ( $A_p$ ), Incremento ( $I$ ) y Tiempo Final ( $T_f$ ). El programa en LabVIEW genera una forma de onda de pulso diferencial, alternando entre una parte alta (duración del ancho de pulso) y una parte baja (duración del período menos el ancho de pulso). Cuando se alcance el voltaje Fin Fermentación la generación de la onda finalizará y se aplicará el voltaje definido como Voltaje Final hasta que el tiempo de ejecución del programa iguale o supere el tiempo definido como Tiempo Final.

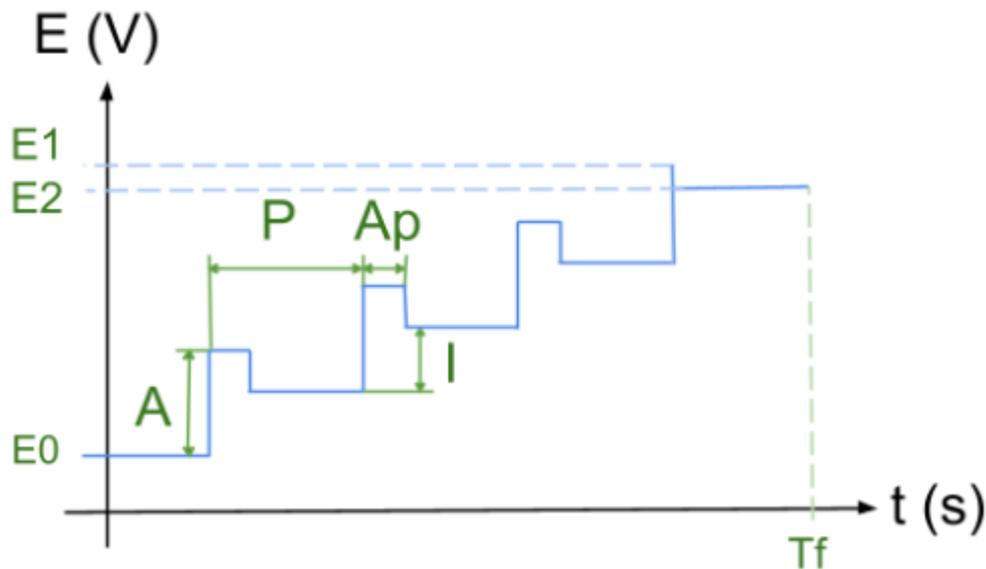


Ilustración 68. Gráfica Onda Pulso Diferencial.

En cuanto a la generación de la onda de pulso diferencial, programa utiliza un Case Structure exterior que controla las dos fases de la onda. En el caso True, que corresponde a la parte alta de la onda, se verifica inicialmente si el contador (contaje) es igual a 0. Si el contador es 0, se incrementa en 2 y al voltaje inicial se le suma la amplitud especificada. Si el contador no es igual a 0, el voltaje permanece constante mientras el contador sigue incrementándose en 2 en cada bucle. Como cada bucle dura 2 segundos, el valor del contador representa el tiempo transcurrido desde que comenzó la parte alta de la onda. Cuando el contador alcanza o supera el valor del ancho de pulso, la salida de esta estructura cambia a False, lo que permite que en el siguiente bucle se ejecute el caso False del Case Structure exterior. Además, el conteo se vuelve a inicializar en 0.

En el caso False, que corresponde a la parte baja de la onda, también se verifica si el contador es igual a 0. Si el contador es 0, el voltaje actual se ajusta restando la amplitud y sumando el incremento de voltaje. Si el contador no es igual a 0, el voltaje permanece constante mientras el contador sigue incrementándose en 2 en cada bucle. Cuando el contador alcanza o supera el valor del Período menos el Ancho de Pulso, la salida de esta estructura cambia a True, permitiendo que en la siguiente iteración se ejecute nuevamente el caso True. De esta forma se suceden varios ciclos hasta que el voltaje supere el valor definido para el voltaje final.



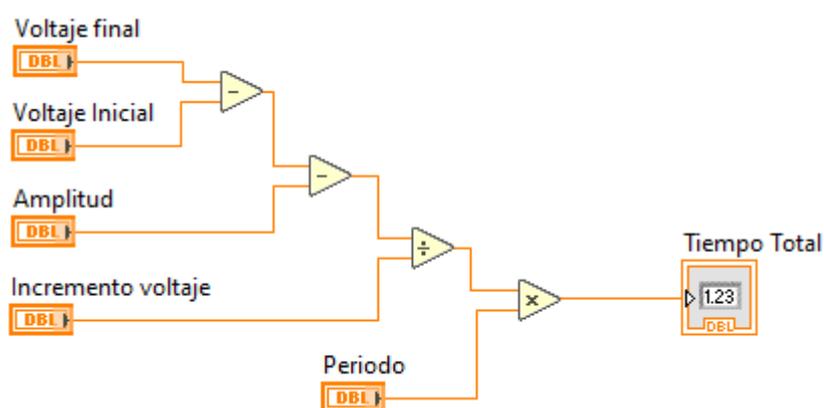
## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL EQUIPO

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



### Tiempo:

Para calcular el tiempo total de la onda de pulso diferencial a partir de sus parámetros, en primer lugar, se comienza determinando el rango efectivo del voltaje. Este rango no es simplemente la diferencia entre el valor inicial y final del voltaje, ya que la amplitud debe restarse para reflejar el rango útil de la onda. Con el rango efectivo calculado, se determina el número de pasos necesarios dividiendo este rango entre el incremento de voltaje por paso. Finalmente, el tiempo total de la onda se obtiene multiplicando el número de pasos por el periodo, que define la duración de cada escalón completo.



*Ilustración 69. VI que calcula el de ejecución de la forma de onda de Pulso Diferencial*



# 5 EXPERIMENTOS REALIZADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

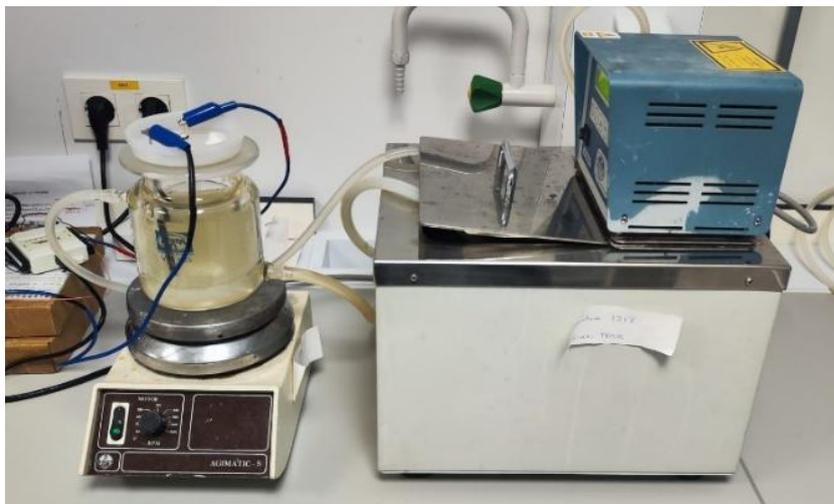
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las experimentaciones. En primer lugar, se detallarán los materiales empleados en los ensayos. A continuación, se expondrán los resultados de las pruebas preliminares llevadas a cabo utilizando una fuente de tensión convencional, en lugar del sistema desarrollado, con el propósito de obtener una visión inicial del impacto de la aplicación de voltaje en un proceso fermentativo conocido. Finalmente, se describirán las pruebas realizadas y los resultados obtenidos con el sistema desarrollado.

## 5.1 Materiales usados

Todos los ensayos se han llevado a cabo en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Valladolid. Además de los componentes previamente mencionados que conforman el sistema de excitación de electrodos, los principales elementos del sistema son los siguientes:

### ● Reactor con sistema de agitación:

El sistema de ilustración 70 fue el utilizado para llevar a cabo los experimentos. Consta de un recipiente de vidrio en el que se incorporan el medio de cultivo y los microorganismos. El sistema de agitación consta de un agitador, cuya función es mezclar el contenido de manera constante para garantizar la uniformidad en la distribución de nutrientes y gases. Además, el biorreactor está equipado con un sensor de temperatura para monitorear y controlar el proceso.



*Ilustración 70. Reactor con sistema de agitación empleado durante los experimentos.*

### ● Electrodo Cátodo:

Se utilizará un electrodo de varilla de grafito de alta pureza, como el mostrado en la ilustración 71, para la electrólisis electroquímica en el cátodo, con una superficie de contacto de 10x20mm [30]. Este cátodo ofrece una buena conductividad y estabilidad durante el proceso electroquímico.



*Ilustración 71. Electrodo de grafito usado en el cátodo durante los ensayos de electrofermentación [30].*

### ● Electrodo Ánodo:

Para el ánodo se empleará un electrodo de malla de platino, representado en la ilustración 72, con una superficie de contacto de 5x90 mm y una pureza del 99.99% [31]. El coste es superior al electrodo de grafito, pero ofrece una alta conductividad y resistencia a la corrosión.



*Ilustración 72. Electrodo de platino usado en el ánodo durante los ensayos de electrofermentación [31].*

### 5.2 Ensayos previos con fuente de tensión

Con el objetivo de evaluar el impacto de la aplicación de corrientes eléctricas en un proceso de fermentación conocido, se llevaron a cabo ensayos preliminares utilizando la fuente de tensión convencional de la ilustración 73, en una fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* para la producción de etanol. Se optó por esta reacción en lugar de la fermentación para obtener 2,3-butanodiol, ya que el proceso de fermentación para etanol es más estudiado y controlado, lo que permite evaluar con mayor precisión la eficacia de la electrofermentación en comparación con el proceso convencional.



*Ilustración 73. Fuente de tensión utilizada durante los ensayos preliminares.*

En total, se realizaron cinco ensayos de fermentación: sin aplicación de tensión (proceso de fermentación normal) y con voltajes de 2V, 4V, 6V y 10V. Este rango de voltajes fue seleccionado para replicar condiciones similares a las de experimentos realizados por investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Sucre y el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Antioquia. Durante las pruebas, se tomaron mediciones cada 2 horas de la concentración de glucosa, con el propósito de monitorear su consumo a lo largo del tiempo, y de la concentración de etanol producido.

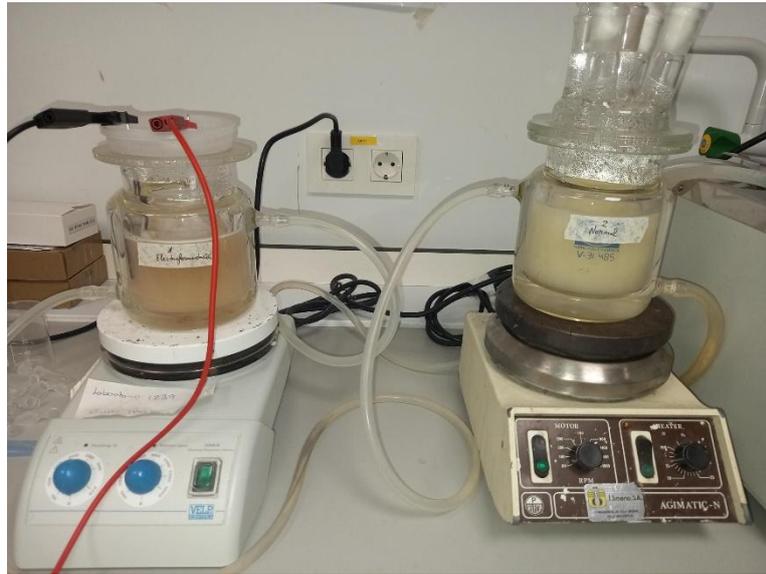


Ilustración 74. Reactores en los sistemas de agitación durante los ensayos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las muestras tomadas cada dos horas:

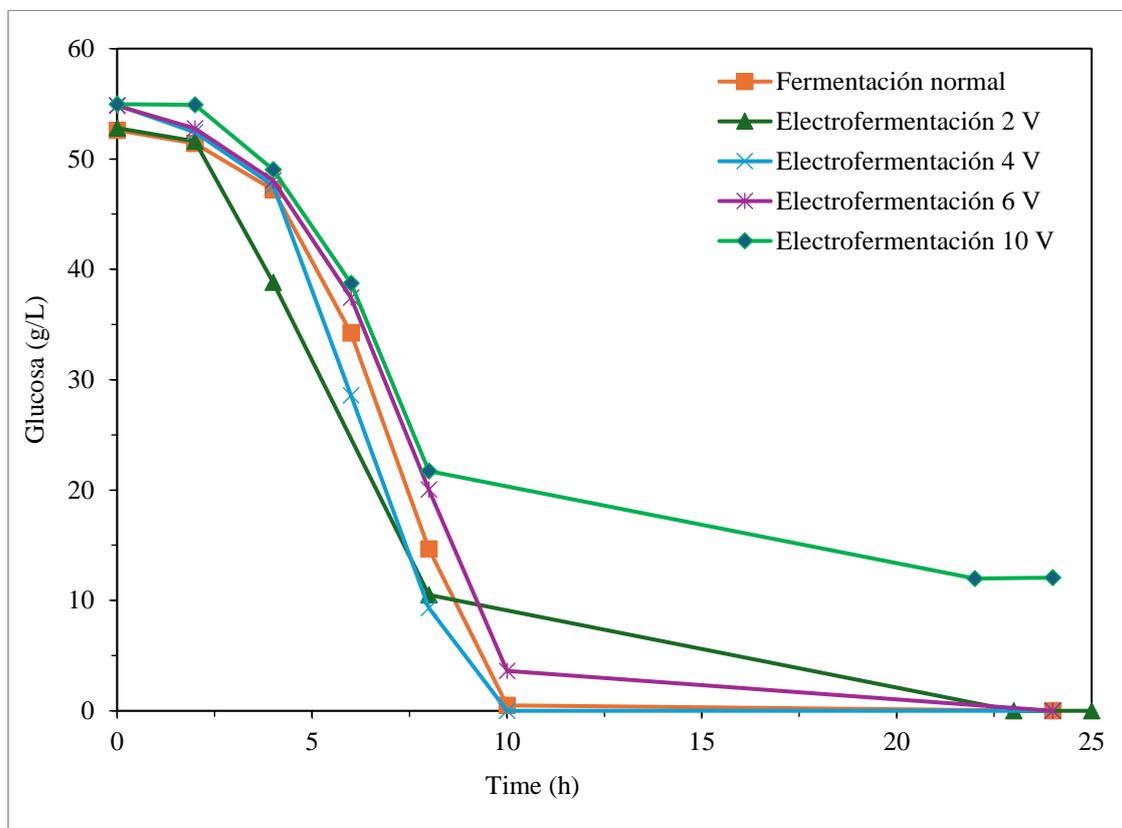


Ilustración 75. Gráfica con los resultados de consumo de glucosa obtenidos durante los ensayos con la fuente de tensión.

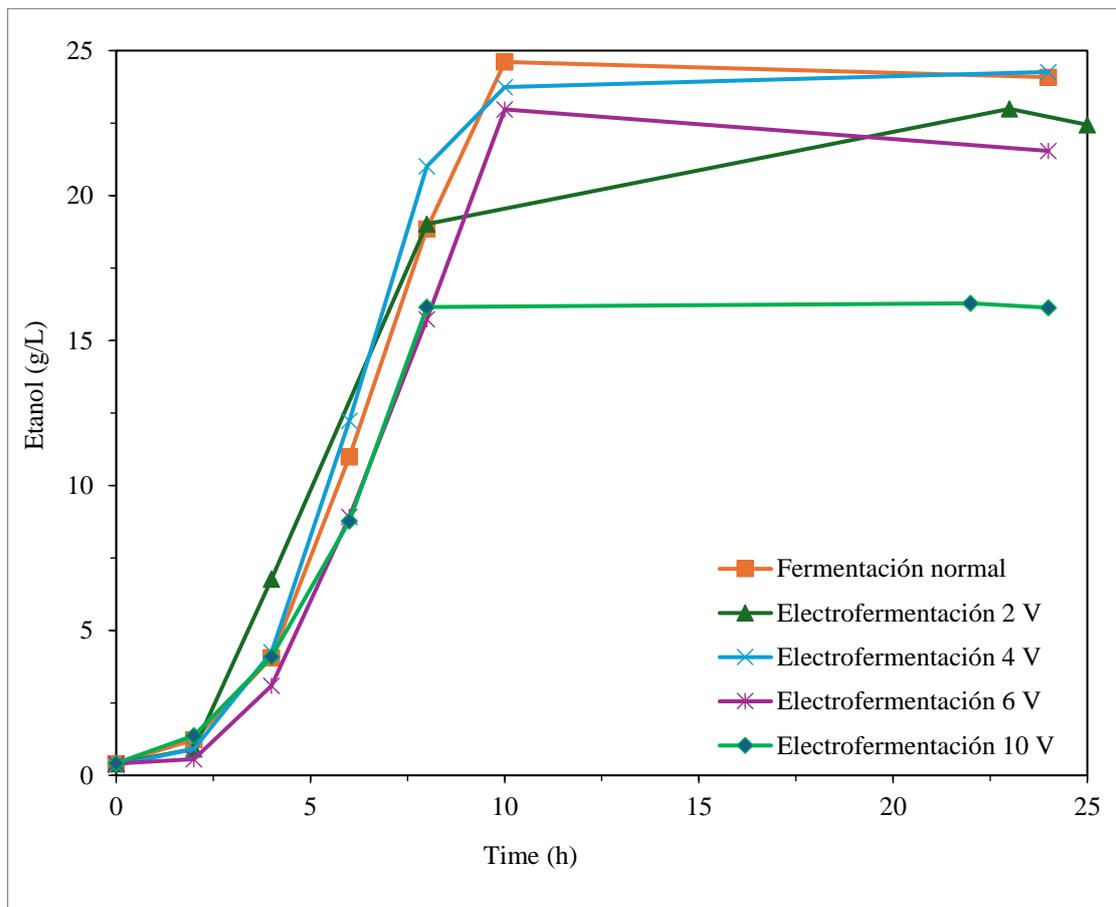


Ilustración 76. Gráfica con los resultados de concentración de etanol obtenidos durante los ensayos con la fuente de tensión.

Tabla 5. Rendimiento Etanol obtenido durante las pruebas preliminares.

RENDIMIENTO ETANOL	$\frac{\text{Etanol Final}}{\text{Glucosa Inicio}} \left(\frac{g}{g}\right)$
Reactor 1: Electrofermentación (10 V)	0,376
Reactor 2: Fermentación normal	0,468
Reactor 3: Electrofermentación (2 V)	0,435
Reactor 4: Electrofermentación (4 V)	0,442
Reactor 5: Electrofermentación (6 V)	0,419



Las gráficas presentadas muestran el comportamiento del proceso de fermentación en términos de la concentración de glucosa y etanol a lo largo del tiempo bajo las distintas condiciones. En la gráfica de la concentración de glucosa, se observa cómo el sustrato principal es consumido con el tiempo. En el caso de la fermentación normal, la glucosa se consume completamente alrededor de las 10 horas. La electrofermentación a 2 V y 4 V muestra un comportamiento similar, con consumo completo de glucosa en tiempos cercanos a las 10 horas, lo que sugiere que estos voltajes no afectan significativamente la velocidad de consumo. Sin embargo, a 6 V, el consumo de glucosa se desacelera ligeramente, completándose alrededor de las 12 horas, mientras que a 10 V se observa una ralentización considerable, dejando un remanente importante de glucosa incluso después de 24 horas, lo cual indica que voltajes elevados inhiben el metabolismo del sustrato.

En la gráfica de la concentración de etanol, se aprecia cómo este producto principal se acumula a lo largo del tiempo. La fermentación normal produce la mayor cantidad de etanol, alcanzando aproximadamente 25 g/L tras 10 horas de fermentación. En la electrofermentación a 2 V y 4 V se observan concentraciones ligeramente inferiores, pero aún dentro de un rango competitivo. Sin embargo, a 6 V la producción de etanol es moderada, pero no alcanza los niveles de la fermentación normal ni de los voltajes más bajos, lo que podría deberse a una ligera inhibición del proceso, y a 10V, la acumulación de etanol es significativamente menor, estabilizándose aproximadamente en 5 g/L, confirmando que voltajes elevados tienen un impacto negativo en la actividad fermentativa.

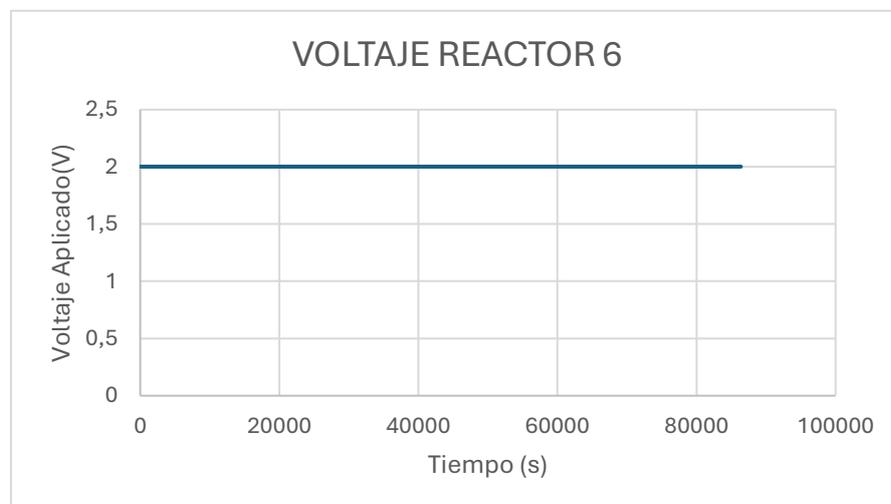
El rendimiento del etanol (g/g) se puede estimar dividiendo la concentración final de etanol (g/L) entre la concentración inicial de glucosa (g/L) al comienzo del proceso de fermentación. Se observa que la fermentación con mayor rendimiento corresponde al proceso normal, seguida por la electrofermentación a 4 V y a 2 V, en línea con lo señalado previamente.

Los resultados obtenidos muestran que la fermentación normal es el método más eficiente tanto en el consumo de glucosa como en la acumulación de etanol. La electrofermentación a 2 V y 4 V presenta un rendimiento aceptable y comparable al proceso tradicional, lo que sugiere que estos voltajes pueden ser utilizados sin afectar significativamente la eficiencia del proceso. Por otro lado, voltajes más altos, como 6 V y 10 V, inhiben notablemente tanto el consumo de glucosa como la producción de etanol, probablemente debido a efectos negativos sobre los microorganismos responsables de la fermentación.

### 5.3 Ensayos con el sistema desarrollado

Se realizaron cinco pruebas con el sistema desarrollado. En la primera prueba (reactor 6), se aplicó un escalón de 2 V constante durante 24 horas. La segunda prueba (reactor 7) consistió en una rampa de voltaje, donde se incrementó el voltaje de 0 a 2 V en un período de 6 horas, manteniendo posteriormente el voltaje constante a 2 V hasta completar las 24 horas. En el tercer ensayo (reactor 8), el procedimiento fue similar al anterior, con la diferencia de que el aumento de 0 a 2 V se realizó en un lapso de 10 horas en lugar de 6. En el cuarto ensayo (reactor 9), se aplicó una onda cíclica de 0 a 2 V con una velocidad de barrido de 0,01 V/s durante 200 ciclos. Finalmente, en el quinto ensayo (reactor 10), se utilizó una onda diferencial de 0 a 3 V, con un pulso de amplitud de 0,5 V, un incremento de 0,02 V, un ancho de pulso de 60 segundos, un periodo de 160 segundos y un voltaje final de 2 V, manteniéndose hasta completar las 24 horas.

A continuación, se muestran las formas de voltaje recogidas por el programa de LabVIEW:



*Ilustración 77. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con un escalón de 2V*

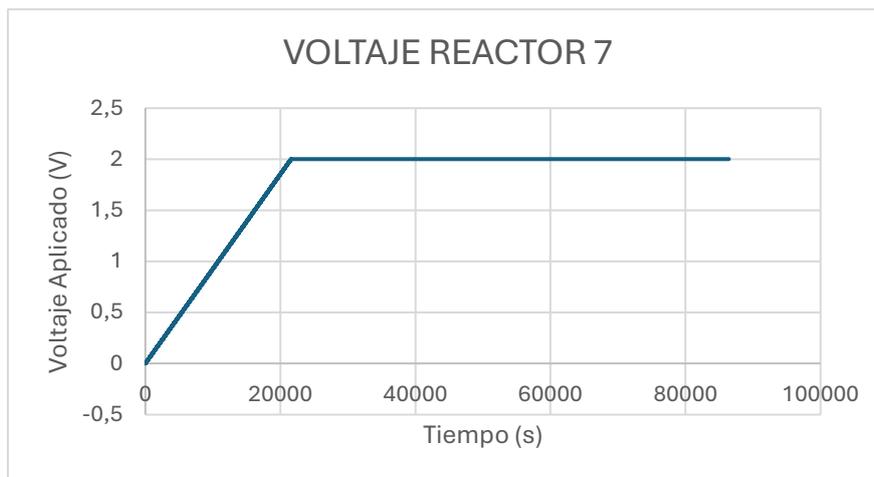


Ilustración 78. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con una rampa de 0 a 2 V durante 6 horas y 2V mantenidos hasta 24 horas

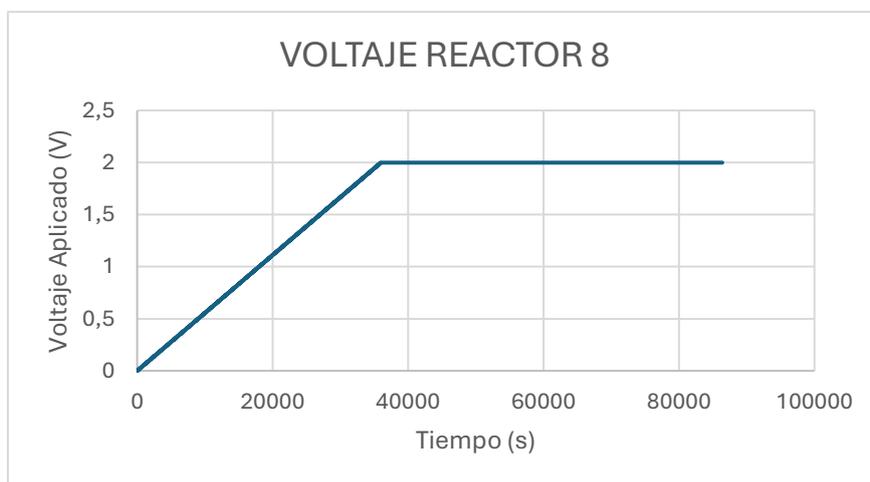


Ilustración 80. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con una rampa de 0 a 2 V durante 10 horas y 2V mantenidos hasta 24 horas

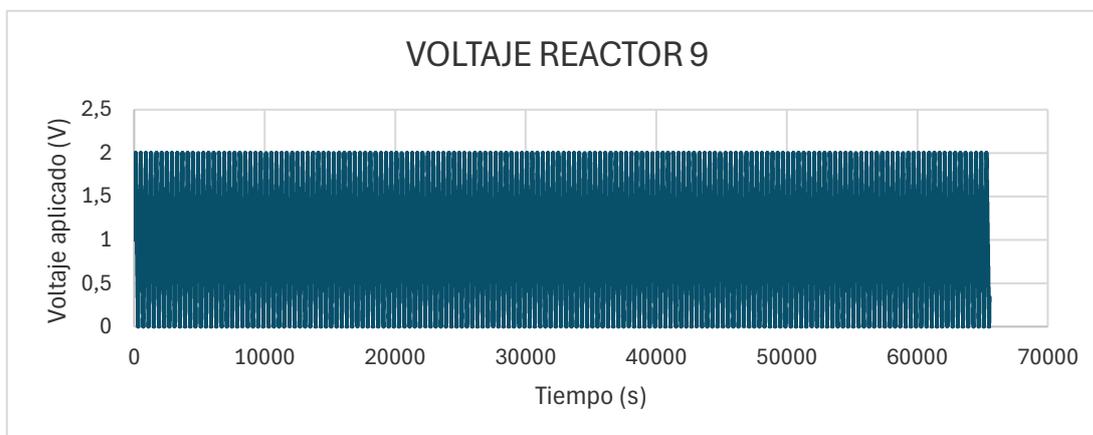


Ilustración 79. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con un ciclo de 0 a 2 V con 0.01 V/s y 200 ciclos



## CAPÍTULO 5: EXPERIMENTOS REALIZADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

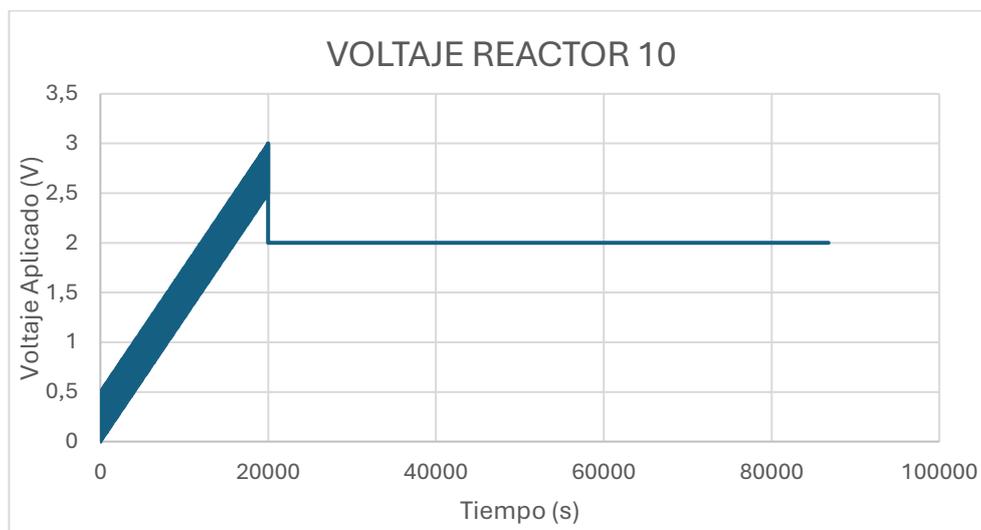


Ilustración 81. Voltaje aplicado durante la prueba de excitación con un pulso diferencial de 0 a 3 V, con pulso de amplitud 0,5 V, incremento 0,02 V, ancho de pulso 60 segundos, periodo 160 segundos y voltaje y tiempo final de 2V y 24 horas

Los resultados obtenidos de las muestras recolectadas durante los ensayos son los siguientes:

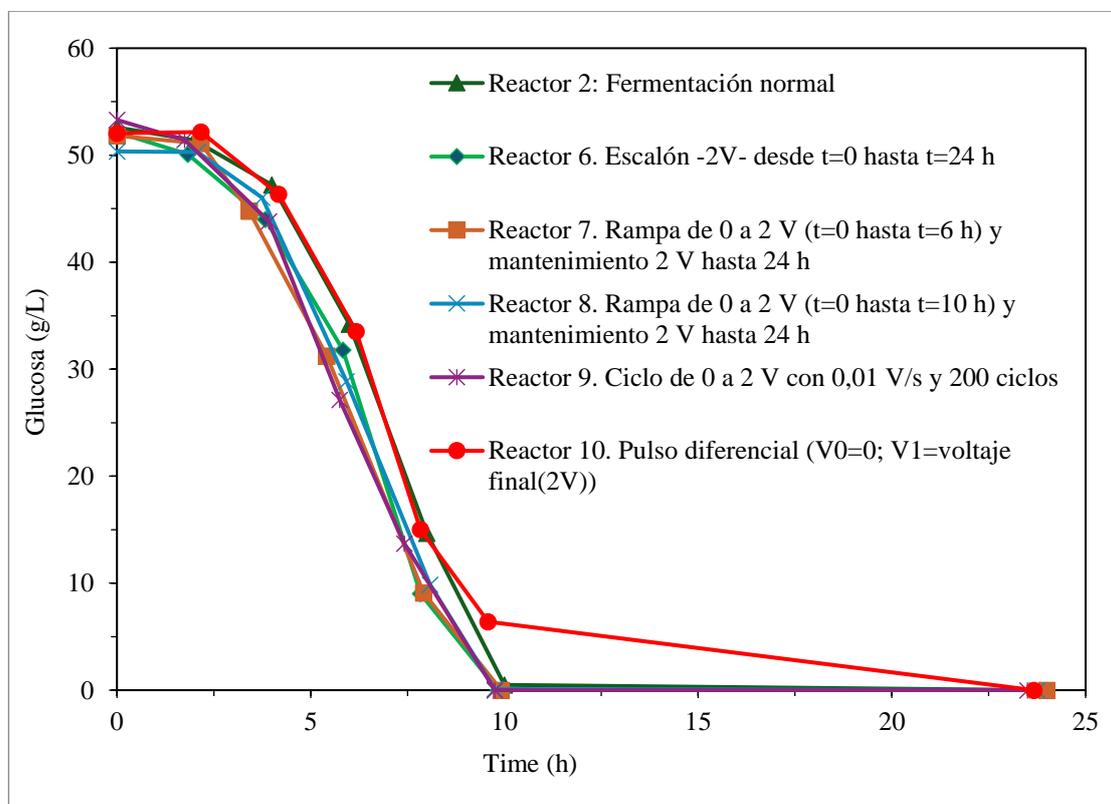


Ilustración 82. Gráfica con los resultados de consumo de glucosa obtenidos durante los ensayos con el sistema desarrollado.

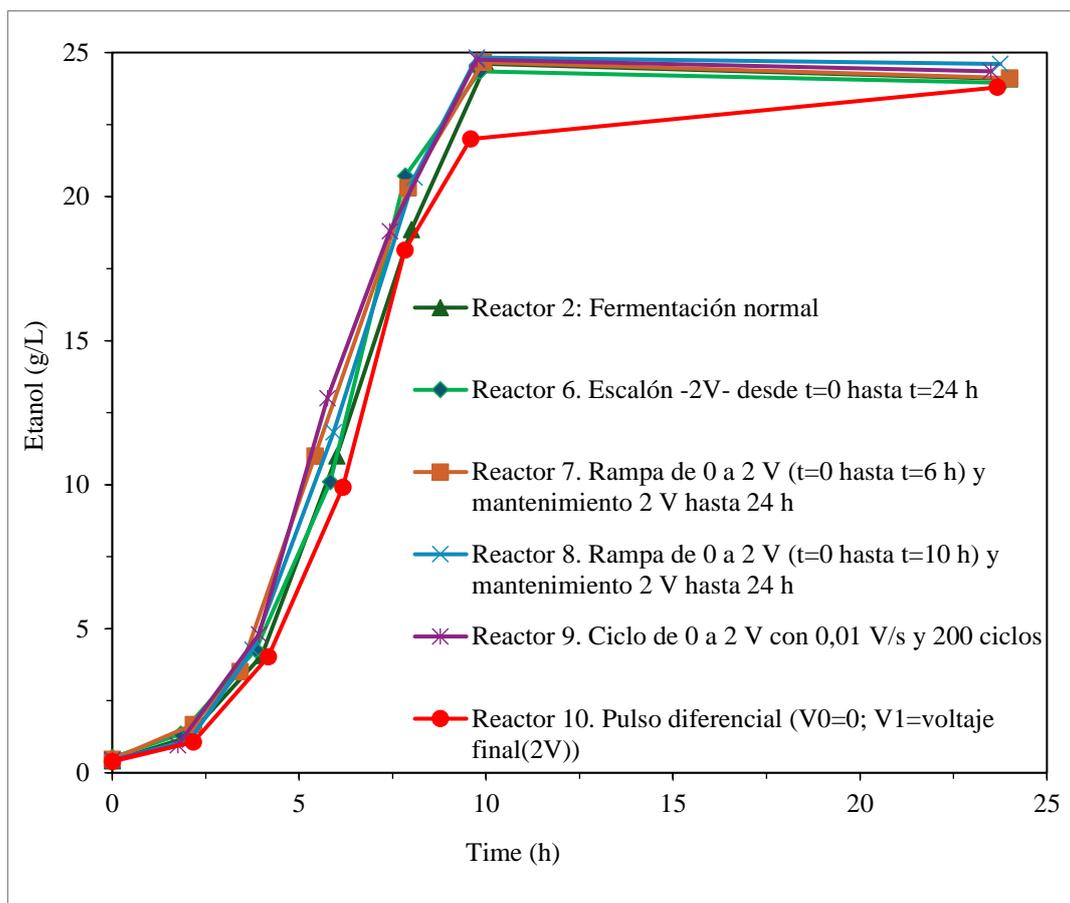


Ilustración 83. Gráfica con los resultados de la producción de etanol obtenidos durante los con el sistema desarrollado.

Tabla 6. Rendimiento Etanol obtenido durante los ensayos realizados con el sistema desarrollado

RENDIMIENTO ETANOL	$\frac{\text{Etanol Final}}{\text{Glucosa Inicio}} \left( \frac{g}{g} \right)$
Reactor 2: Fermentación normal	0,468
Reactor 6. Escalón 2V desde t=0 hasta t=24 h	0,467
Reactor 7. Rampa de 0 a 2 V (t=0 hasta t=6 h) y mantenimiento 2 V hasta 24 h	0,476
Reactor 8. Rampa de 0 a 2 V (t=0 hasta t=10 h) y mantenimiento 2 V hasta 24 h	0,493
Reactor 9. Ciclo de 0 a 2 V con 0,01 V/s y 200 ciclos	0,464
Reactor 10. Pulso diferencial (V0=0; V1=voltaje final(2V))	0,457

Analizando los resultados podemos observar que siguen la tendencia de las pruebas preliminares. En la fermentación normal, el consumo de glucosa siguió una cinética típica, con una disminución gradual en las primeras horas y un agotamiento casi completo antes de las 10 horas. Las condiciones eléctricas



aplicadas en los reactores no alteraron significativamente esta tendencia, ya que ambas curvas siguen un patrón similar al de la fermentación normal. Es importante destacar que, salvo en el Reactor 10 (pulso diferencial), en los demás ensayos la concentración de glucosa se mantiene ligeramente por encima de la fermentación normal durante las primeras horas, indicando un consumo inicial más lento en comparación con el reactor sin aplicación de voltaje.

En cuanto a la producción de etanol, todos los reactores alcanzaron una concentración final similar de aproximadamente 25 g/L, lo que indica que la aplicación de un potencial eléctrico no afectó significativamente la conversión final de sustrato en producto. Además, se observa que, en todas las condiciones, excepto en el Reactor 10, la concentración de etanol durante las primeras horas de fermentación es ligeramente superior a la observada en la fermentación normal. Esto sugiere que, aunque la aplicación de voltajes no modifica el rendimiento final del proceso, sí podría influir en la velocidad de producción de etanol en las etapas iniciales de la fermentación.

Finalmente, el análisis del rendimiento de etanol en las distintas pruebas, mostrado en la tabla 6, indica que el Reactor 8, con una rampa de 0 a 2V en 10 horas, alcanzó la mayor eficiencia, seguido por el Reactor 7, donde la rampa se aplicó en 6 horas, lo que sugiere que estas condiciones favorecen la conversión de glucosa en etanol. La fermentación normal y el escalón de 2V mostraron valores similares, evidenciando que este último no tuvo un impacto significativo en la eficiencia. En contraste, el Reactor 9, con un ciclo de 0 a 2V, presentó un rendimiento menor, mientras que el Reactor 10, con pulso diferencial, registró el más bajo, lo que indica que esta estrategia de estimulación podría haber afectado negativamente el proceso. Cabe destacar también que los resultados obtenidos con el dispositivo son análogos a los logrados con la fuente de alimentación tradicional, pero con un coste significativamente menor, lo que refuerza su viabilidad como alternativa en estos procesos.



# 6 ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se realiza una evaluación general de los costes económicos asociados a la ejecución de este proyecto. Se analizarán tanto el tiempo invertido en el desarrollo del trabajo como los costes materiales de los dispositivos utilizados. Asimismo, se incluirá una estimación aproximada de los costes indirectos relacionados.

## 6.1 Tiempo invertido y costes de personal

Durante la ejecución del proyecto se ha llevado a cabo un recuento de horas para saber cuántas han sido dedicadas a la elaboración de este. El recuento total ha sido de 352 horas, se ha dividido en actividades para tener más detalle de la ocupación total.

Tabla 7. Clasificación del número total de horas dedicadas al proyecto por actividad.

ACTIVIDAD	SUMA N.º DE HORAS
Experimentos	32
Fabricación PCB	2
Investigación	61
Presentación TFM	32
Programación LabVIEW	124
Redacción Memoria	89
Tutorías docentes	12
<b>TOTAL</b>	<b>352</b>



## CAPÍTULO 6: ESTUDIO ECONÓMICO



Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

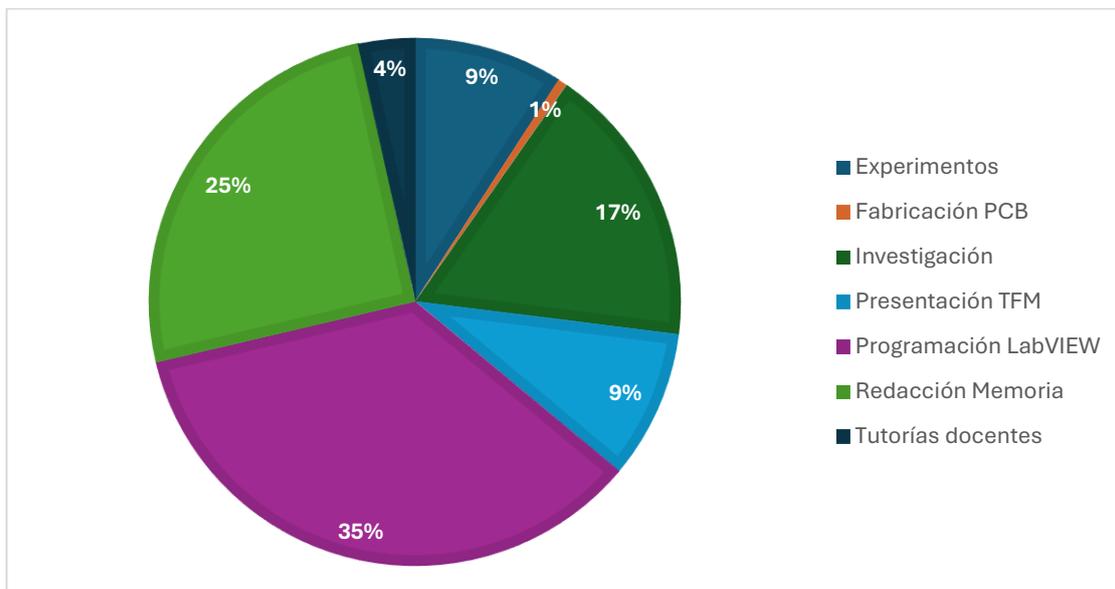


Ilustración 84. Gráfico que muestra la clasificación del número total de horas dedicadas al proyecto por actividad

El profesional encargado de ejecutar este trabajo posee un título universitario oficial en Ingeniería, lo que, de acuerdo con la Disposición 6346 del BOE publicada el 10 de marzo de 2023, le otorga un nivel salarial 1 [32]. Según lo establecido en la Disposición 5873 del BOE publicada el 23 de marzo de 2024, que recoge las tablas salariales para 2024 del XX Convenio Colectivo Nacional de Empresas de Ingeniería, Oficinas de Estudios Técnicos, Inspección, Supervisión y Control Técnico y de Calidad [33], su salario anual bruto debería ascender a 28.664,12 euros.

Se considera una jornada laboral de 8 horas diarias y 22 días laborables al mes, 352 horas corresponden a 44 días, es decir, 2 meses. Por tanto, el salario bruto correspondiente a este periodo sería:

$$\frac{28664,12\text{€}}{12 \text{ meses}} \cdot 2 \text{ meses} = 4777,35 \text{ €} \quad (7)$$

El coste total de personal es, por tanto: 4777,35 €



## CAPÍTULO 6: ESTUDIO ECONÓMICO



Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

Tabla 8. Tablas salariales 2024 según el nivel salarial [33]

Año 2024

Nivel salarial	Tabla salarial art. 33		Plus convenio según art. 38 convenio - Euros	Total anual - Euros
	Mes x 14 - Euros	Anual - Euros		
1	1.869,33	26.170,62	2.493,50	28.664,12
2	1.409,34	19.730,76	2.493,50	22.224,26
3	1.358,99	19.025,86	2.493,50	21.519,36
4	1.245,94	17.443,16	2.493,50	19.936,66
5	1.113,26	15.585,64	2.493,50	18.079,14
6	959,14	13.427,96	2.493,50	15.921,46
7	926,96	12.977,44	2.493,50	15.470,94
8	926,21	12.966,94	2.493,50	15.460,44

## 6.2 Costes materiales asociados al proyecto

A continuación, se muestra una tabla que recoge los costes de los materiales involucrados en el proyecto:

Tabla 9. Costes de los materiales empleados en el proyecto.

MATERIAL	COSTE
Tarjeta NI USB 6008 [34]	92 €
Placa PCB	10 €
Amplificador AD623 [25]	12,91 €
Amortización software LabVIEW	134 €
Amortización software Proteus	0,39 €
Reactor con sistema de agitación	4.000 €
Electrodo de Platino [31]	46 €
Electrodo de Grafito [30]	10 €
Ordenador de sobremesa + Monitor [35]	600 €
<b>TOTAL</b>	<b>4.905,3 €</b>

En la tabla se han incluido como referencia los artículos adquiridos específicamente, o, en su defecto, productos con características similares cuando no ha sido posible encontrar los originales.



El cálculo de las amortizaciones de los softwares utilizados se ha basado en los cálculos presentados a continuación. Cabe destacar que la Universidad de Valladolid dispone de las licencias de ambos programas, por lo que no ha sido necesario realizar el pago de estas.

- **Amortización Software LabVIEW:**

La licencia de la versión de desarrollo completo de LabVIEW es necesaria únicamente durante la fase de desarrollo del programa. Sin embargo, para su ejecución, es posible utilizar versiones gratuitas. Por este motivo, solo se imputará al proyecto la amortización correspondiente a su uso, que ha sido de 3 meses. El precio de la licencia de desarrollo es de 536 €/año [36], por lo que la amortización correspondiente al periodo de uso se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{536\text{€}}{1 \text{ año} \cdot 12 \text{ meses/año}} \cdot 3 \text{ meses} = 134 \text{ €} \quad (8)$$

- **Amortización Software Proteus Professional:**

El precio de una licencia básica de Proteus Professional es de 433 € [37]. Suponiendo una vida útil de 3 años y considerando que el uso ha sido de 1 día, la amortización es la siguiente:

$$\frac{433\text{€}}{3 \text{ años} * 365 \text{ días/año}} \cdot 1 \text{ día} = 0,39 \text{ €} \quad (9)$$

### 6.3 Costes indirectos

Es necesario incluir los costes indirectos en el proyecto ya que representan los gastos generales que permiten su funcionamiento, si bien, no se pueden atribuir directamente a una tarea específica. Estos costes incluyen conceptos como electricidad, internet, alquiler y otros gastos generales. Dado que se trata de un proyecto pequeño podemos hacer una estimación a través de los costes directos del mismo. Los costes indirectos equivaldrán a un 10% de los costes directos, es decir el coste de personal más los materiales:

$$\text{Costes directos} = 4.777,35 + 4.905,3 = 9.682,65\text{€} \quad (10)$$

Los costes indirectos serán, por tanto:

$$\text{Costes indirectos} = 9.682,65 \cdot 0,1 = 968,27 \text{€} \quad (11)$$

### 6.4 Costes totales

Los costes totales se obtendrán sumando los costes analizados hasta el momento, es decir, los costes de material y personal, que constituyen los costes directos, junto con los costes indirectos. En este caso, el coste total del proyecto es de 10.651 €, como se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 10. Costes totales del proyecto.

<b>COSTES</b>	<b>COSTE DE PERSONAL</b>	<b>4.777,35 €</b>
<b>DIRECTOS</b>	<b>COSTE DE MATERIALES</b>	<b>4.905,30 €</b>
	<b>COSTES INDIRECTOS</b>	<b>968,27 €</b>
	<b>COSTES TOTALES</b>	<b>10.650,92 €</b>

A continuación, se presenta el porcentaje que representa cada uno de los costes en el total del proyecto. Se puede observar que el mayor coste corresponde a los materiales utilizados.

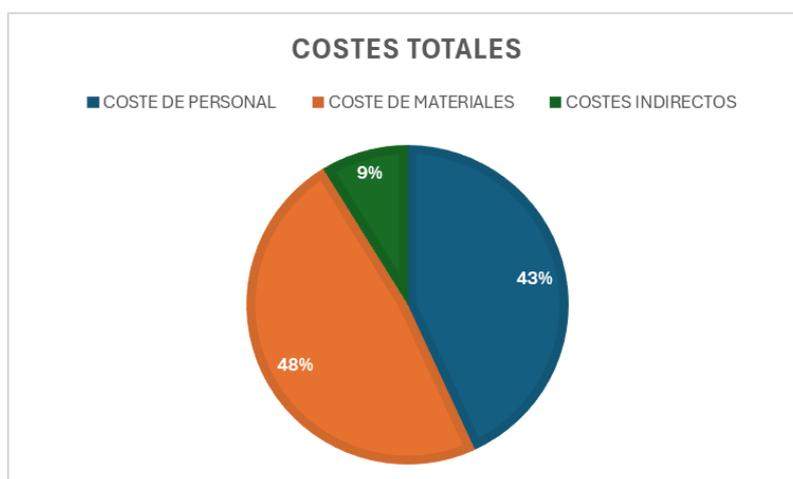


Ilustración 85. Gráfico del porcentaje que representan cada uno de los costes asociados al proyecto.



# 7 CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

En este capítulo se recogen las conclusiones obtenidas a partir de la realización de este Trabajo de Fin de Máster, así como las posibles líneas de futuro derivadas de él.

## 7.1 Conclusiones

De acuerdo con los objetivos establecidos inicialmente, se concluye que la mayoría han sido alcanzados con éxito. En este trabajo, se ha desarrollado un sistema para la experimentación de electrofermentaciones en un reactor, proporcionando una alternativa más económica y flexible en comparación con una fuente de tensión convencional, cumpliendo con el objetivo principal del proyecto. Además, el sistema ofrece un entorno gráfico intuitivo y fácil de usar, que permite una aplicación flexible y versátil de estímulos eléctricos con distintas formas de onda, aportando al usuario la posibilidad de ajustar y optimizar los parámetros según las necesidades de cada experimento.

Como punto adicional, se ha creado un manual de usuario, disponible en los anexos, que facilita la comprensión y uso del sistema.

Respecto a los objetivos específicos, se seleccionó la configuración de celda electroquímica más adecuada a través de un análisis de posibles materiales compatibles, optando por electrodos de grafito y platino. Esta exploración de materiales abre, además, la puerta a nuevas investigaciones, que se abordarán más adelante.

Asimismo, se diseñó y desarrolló un sistema electrónico con capacidad de aplicar distintas formas de onda a los electrodos mediante el uso del software LabVIEW, junto con una tarjeta de adquisición de datos. Además, se diseñó una placa de circuito impreso auxiliar para integrar el circuito de medición del consumo de corriente. LabVIEW fue configurado adecuadamente para garantizar un funcionamiento continuo durante 24 horas, registrando datos con la frecuencia necesaria para asegurar la precisión de las mediciones sin riesgo de saturación, permitiendo así el correcto desarrollo del experimento y la salvaguarda de los datos recopilados durante el mismo.



Finalmente, el sistema desarrollado fue sometido a pruebas experimentales para evaluar su desempeño y garantizar su fiabilidad como herramienta de investigación. Si bien los ensayos no mostraron diferencias significativas en el rendimiento de la fermentación en términos de consumo de glucosa y producción de etanol, los resultados obtenidos confirman que el sistema cumple con los requisitos necesarios para el estudio de procesos de electrofermentación. Su facilidad de uso y capacidad de adaptación lo convierten en una herramienta útil para futuras investigaciones en este ámbito dentro de la Universidad.

### 7.2 Posibles líneas de futuro

Respecto a las líneas futuras, se presentan diversas posibilidades de exploración y mejora. Una primera vía de exploración radica en la evaluación de distintos materiales para los electrodos, con el propósito de analizar su influencia en el rendimiento y eficiencia del proceso. Esta variación permitiría comprender mejor la interacción entre el material conductor y el entorno fermentativo.

Asimismo, el sistema podría enriquecerse mediante la integración de sensores de pH y temperatura, lo que proporcionaría una caracterización más completa de las condiciones del proceso. Esta mejora permitiría no solo un mayor control sobre la fermentación, sino también una recopilación de datos más extensa y detallada, facilitando el análisis y la optimización del proceso electrofermentativo.

Otra línea de desarrollo tecnológico consistiría en la optimización del sistema de conversión de señal digital a analógica. En la actualidad, este proceso se lleva a cabo mediante una tarjeta de adquisición de datos con una limitación de 5 V. La implementación de un sistema más avanzado y versátil posibilitaría la exploración de un rango de voltajes más amplio, eliminando restricciones y ampliando el espectro de experimentación.

Por último, una dirección de especial interés sería la aplicación del sistema en distintos microorganismos y rutas metabólicas. Este enfoque permitiría evaluar su impacto en una variedad de procesos fermentativos, consolidando su utilidad como una herramienta adaptable y robusta.



# 8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Celdas de electrólisis microbianas,» Biovino, 12 04 2021. [En línea]. Available: <https://biovino.es/celdas-de-electrolisis-microbianas/>. [Último acceso: 10 10 2024].
- [2] BIOTED, «BIOFEREMENTACIÓN Y BIOPROCESAMIENTO DE PROTEÍNAS CROMOGÉNICAS».
- [3] REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA QUÍMICA Vol. 6, No.1 (2007) 33-40, «DISEÑO DE BIORREACTORES PARA FERMENTACIÓN EN MEDIO SÓLIDO,» 2005.
- [4] M. T. Mandigan, J. M. Martinko, K. S. Bender, D. H. Buckley y D. A. Stahl, *Biología de los microorganismos*, PEARSON, 2015.
- [5] Universidad Abierta y a Distancia de México, «Crecimiento celular y regímenes de fluidización,» de *Ingeniería de biorreactores*.
- [6] H. C. Yoruklu, E. O. Koroglu, A. Demir y B. Ozkaya, «The Electromotive-Induced Regulation of Anaerobic Fermentation,» de *Microbial Electrochemical Technology*, Isevier, 2019, pp. 739-756.
- [7] F. Harnisch y D. Holtmann, *Bioelectrosynthesis*, Springer, 2019.
- [8] P. Kumar y C. Kuppam, *Bioelectrochemical systems Vol.1 Principles and Processes*, Warangal, Telangana, India: Springer, 2020.
- [9] C. A. García-Mogollón, D. F. Mendoza y J. C. Quintero-Díaz, «Electrostatic ethanol fermentation: Experimental study and,» *Heliyon*, 2024.
- [10] M. J. Mota, R. P. Lopes, M. Koubaa, S. Roohinejad, F. J. Barba y I. Delgadillo, «Fermentation at non-conventional conditions in food- and bio-sciences by the application of advanced processing technologies.,» *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017.
- [11] T. M. von Zuben, A. G. Salles Jr. y J. A. Bonacin, «Low-cost open-source potentiostats: A comprehensive review of DIY solutions and fundamental



## CAPÍTULO 8: BIBLIORAFÍA

*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*



- concepts of electronics and its integration with electrochemistry,» Elsevier , Campinas, SP, Brazil, 2024.
- [12] K. Scott y E. H. Yu, Microbial Electrochemical and Fuel Cells. Fundamental and Applications, Elsevier, 2016.
- [13] Department of Chemical Engineering and Biotechnology, «Linear Sweep and Cyclic Voltametry: The Principles,» CEB, [En línea]. Available: <https://www.ceb.cam.ac.uk/research/groups/rg-eme/Edu/linear-sweep-and-cyclic-voltametry-the-principles>. [Último acceso: 27 10 2024].
- [14] «A Comprehensive Guide On Square Wave Voltammetry,» Macias Sensors, 12 6 2023. [En línea]. Available: <https://maciassensors.com/es/voltamperometria-de-onda-cuadrada/>. [Último acceso: 27 10 2024].
- [15] D. Harvey, «11.4: Métodos voltamétricos y amperométricos,» Libretexts, [En línea]. Available: [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica\\_Anal%C3%ADtica/Qu%C3%ADmica\\_Anal%C3%ADtica\\_2.1\\_%28Harvey%29/11%3A\\_M%C3%A9todos\\_electroqu%C3%ADmicos/11.04%3A\\_M%C3%A9todos\\_voltam%C3%A9tricos\\_y\\_amperom%C3%A9tricos](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica/Qu%C3%ADmica_Anal%C3%ADtica_2.1_%28Harvey%29/11%3A_M%C3%A9todos_electroqu%C3%ADmicos/11.04%3A_M%C3%A9todos_voltam%C3%A9tricos_y_amperom%C3%A9tricos). [Último acceso: 27 10 2024].
- [16] «In Need Of Precise Electrochemical Analysis? Try Differential Pulse Voltammetry,» MACIAS SENSORS, 1 8 2023. [En línea]. Available: [https://maciassensors.com/es/voltamperometria-diferencial-de-impulsos/#:~:text=La%20voltamperometr%C3%ADa%20diferencial%20de%20impulsos%20\(DPV\)%2C%20tambi%C3%A9n%20conocida%20como,una%20rampa%20de%20potencial%20lineal.](https://maciassensors.com/es/voltamperometria-diferencial-de-impulsos/#:~:text=La%20voltamperometr%C3%ADa%20diferencial%20de%20impulsos%20(DPV)%2C%20tambi%C3%A9n%20conocida%20como,una%20rampa%20de%20potencial%20lineal.). [Último acceso: 27 10 2024].
- [17] M. E. Borrero Serrano, «HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL CONTROL REMOTO DE UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN MEDIANTE UNA INTERFAZ GRÁFICA,» e-Reading, [En línea]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11986>. [Último acceso: 08 11 24].
- [18] J. Jerome, Virtual Instrumentation Using LabVIEW, New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010.
- [19] T. O, «LabVIEW-Logo,» SoftwareKey SYSTEM, [En línea]. Available: <https://www.softwarekey.com/blog/softwarekey-system-product->



## CAPÍTULO 8: BIBLIORAFÍA



*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*

- tips/choosing-best-licensing-method-labview-tools/attachment/labview-logo-2/. [Último acceso: 08 11 2024].
- [20] R. Pallás Areny, Adquisición y distribución de señales, Barcelona: Marcombo, Boixareu Editores, 1993.
- [21] H. S. Kalsi, Electronic Instrumentation, 3e, New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2010.
- [22] «Dispositivo de E/S Multifunción USB-6008,» NI, [En línea]. Available: [https://www.ni.com/es-es/support/model.usb-6008.html?srsltid=AfmBOopnBMc8FrBc\\_6x\\_e0CDOSss5\\_Q3V6DrdEKYQNf-TKdLK6-dwPwE](https://www.ni.com/es-es/support/model.usb-6008.html?srsltid=AfmBOopnBMc8FrBc_6x_e0CDOSss5_Q3V6DrdEKYQNf-TKdLK6-dwPwE). [Último acceso: 29 12 2024].
- [23] «National Instruments USB-6008/6009,» UCD APL, [En línea]. Available: [https://physicslabs.ucd.ie/docs/dacq/dacq\\_ni/](https://physicslabs.ucd.ie/docs/dacq/dacq_ni/). [Último acceso: 29 12 2024].
- [24] NI, «USB-6008 Specifications,» NI, 20 02 2024. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6008-specs/page/specs.html>. [Último acceso: 29 12 2024].
- [25] «Analog Devices AD623ANZ,» MOUSER ELECTRONICS, [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/ProductDetail/Analog-Devices/AD623ANZ?qs=NmRFExCfTkFNc5Hlpv4LKQ%3D%3D&srsltid=AfmBOopa1stBpumqpK7fnACNJalSDtm-eKcTudSXqVE8E8GhH2GEFPY>. [Último acceso: 29 12 2024].
- [26] Altium, «¿Qué es un PCB o Placa de Circuito Impreso?,» [En línea]. Available: <https://resources.altium.com/es/p/what-is-a-pcb>. [Último acceso: 27 12 2024].
- [27] Universidad de Sevilla, «Tutorial de LabVIEW,» [En línea]. Available: [https://woody.us.es/ASIGN/IE\\_4T/Tutorial%20de%20Labview.pdf](https://woody.us.es/ASIGN/IE_4T/Tutorial%20de%20Labview.pdf). [Último acceso: 09 11 2024].
- [28] NI, «Aprenda conceptos básicos de programación gráfica con LabVIEW,» NI Learning Center, [En línea]. Available: [https://learn.ni.com/learn/article/labview-tutorial-spanish#TARGET\\_2](https://learn.ni.com/learn/article/labview-tutorial-spanish#TARGET_2). [Último acceso: 09 11 2024].
- [29] NI, «NI DAQ Assistant,» 17 02 2023. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/measurement-studio-ni-daqmx-projects-for-.net->



- 4.5.1/page/netdaqasst.html?srsId=AfmBOopi4D\_0cd7dhOz4MjdEnZIU Sgpn-UWq2VcDOe2vcGedHmzUMDR. [Último acceso: 01 01 2025].
- [30] «Electrodo de varilla de grafito de alta pureza,» AliExpress, [En línea]. Available: [https://es.aliexpress.com/item/1005005595617318.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=439-079-4345&isdl=y&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google\\_7\\_shopping&aff\\_platform=google&aff\\_short\\_key=UneMJZVf&gclsrc=aw.ds&&albagn=888888&&ds\\_e\\_adid=&ds\\_e\\_matchtype](https://es.aliexpress.com/item/1005005595617318.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=439-079-4345&isdl=y&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google_7_shopping&aff_platform=google&aff_short_key=UneMJZVf&gclsrc=aw.ds&&albagn=888888&&ds_e_adid=&ds_e_matchtype). [Último acceso: 22 01 2025].
- [31] «Electrodo de malla de platino,» AliExpress , [En línea]. Available: [https://es.aliexpress.com/item/1005004839680243.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=439-079-4345&isdl=y&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google\\_7\\_shopping&aff\\_platform=google&aff\\_short\\_key=UneMJZVf&gclsrc=aw.ds&&albagn=888888&&ds\\_e\\_adid=&ds\\_e\\_matchtype](https://es.aliexpress.com/item/1005004839680243.html?src=google&src=google&albch=shopping&acnt=439-079-4345&isdl=y&slnk=&plac=&mtctp=&albbt=Google_7_shopping&aff_platform=google&aff_short_key=UneMJZVf&gclsrc=aw.ds&&albagn=888888&&ds_e_adid=&ds_e_matchtype). [Último acceso: 22 01 2025].
- [32] M. d. T. y. E. Social, «Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado,» [En línea]. Available: [https://www.boe.es/eli/es/res/2023/02/27/\(6\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2023/02/27/(6)). [Último acceso: 22 01 2025].
- [33] M. d. T. y. E. Social, «Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado,» [En línea]. Available: [https://www.boe.es/eli/es/res/2024/03/12/\(9\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2024/03/12/(9)). [Último acceso: 22 01 2025].
- [34] «AliExpress,» Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008, multifunción, 779051 DAQ, 01, [En línea]. Available: [https://es.aliexpress.com/item/1005004556155160.html?spm=a2g0o.productlist.main.3.552949a7Bn0Tig&algo\\_pvid=20bdc674-1a8a-4a1f-8a70-4b019e4863bf&algo\\_exp\\_id=20bdc674-1a8a-4a1f-8a70-4b019e4863bf-1&pdp\\_npi=4%40dis%21EUR%2199.34%2192.39%21%21%21735.31%21683.8](https://es.aliexpress.com/item/1005004556155160.html?spm=a2g0o.productlist.main.3.552949a7Bn0Tig&algo_pvid=20bdc674-1a8a-4a1f-8a70-4b019e4863bf&algo_exp_id=20bdc674-1a8a-4a1f-8a70-4b019e4863bf-1&pdp_npi=4%40dis%21EUR%2199.34%2192.39%21%21%21735.31%21683.8). [Último acceso: 22 01 2025].
- [35] «Ordenador Sobremesa Epical-Q Pack Office1 Intel Core i5-11400/16GB/480GB SSD + Monitor 23.6" + Tecla,» PcComponentes, [En línea]. Available: [https://www.pccomponentes.com/ordenador-sobremesa-epical-q-pack-office1-intel-core-i5-11400-16gb-480gb-ssd-monitor-236-teclado-raton?utm\\_source=366479&utm\\_medium=afi&utm\\_campaign=es-](https://www.pccomponentes.com/ordenador-sobremesa-epical-q-pack-office1-intel-core-i5-11400-16gb-480gb-ssd-monitor-236-teclado-raton?utm_source=366479&utm_medium=afi&utm_campaign=es-)



## CAPÍTULO 8: BIBLIORAFÍA



*Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación*

go.kelkoogroup.net&sv1=affiliate&sv\_campaign\_id=366479&awc=20981\_17411183. [Último acceso: 04 03 2025].

- [36] «Seleccione su edición de NI LabVIEW,» NI, [En línea]. Available: [https://www.ni.com/es/shop/labview/select-edition.html?srsId=AfmBOop\\_WtbX937Gqg08sF7d6lljT1G8Q65E6582eUzO9VLTrDwaeZnP](https://www.ni.com/es/shop/labview/select-edition.html?srsId=AfmBOop_WtbX937Gqg08sF7d6lljT1G8Q65E6582eUzO9VLTrDwaeZnP). [Último acceso: 22 01 2025].
- [37] «Commercial Price List,» Proteus , [En línea]. Available: <https://www.labcenter.com/pricing/comm/>. [Último acceso: 22 01 2025].



## 9 ANEXOS

### 9.1 Datos recopilados durante las pruebas preliminares

- Reactor conectado a una fuente de tensión de 10 V:

Tabla 11. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación conectado a 10V.

Reactor 1: Electrofermentación (10 V)			
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	Ác. Acético (g/L)
0	54,97	0,42	0,00
2	54,92	1,38	0,00
4	49,03	4,09	0,65
6	38,74	8,77	0,67
8	21,72	16,16	0,69
22	11,98	16,28	1,00
24	12,07	16,13	1,13
	<b>Rendimiento Etanol</b>	<b>0,376</b>	

- Reactor sin conexión a una fuente de tensión:

Tabla 12. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación sin conexión a una fuente de tensión.

Reactor 2: Fermentación normal					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	Ác. Acético (g/L)	Consumo glucosa (g/h)	Formación EtOH (g/h)
0	52,60	0,41	0,00		
2	51,40	1,23	0,00	0,150	0,103
4	47,22	4,07	0,00	0,523	0,354
6	34,22	10,99	0,00	1,625	0,866
8	14,66	18,85	0,00	2,445	0,982
10	0,49	24,61	0,00	1,772	0,719
24	0,00	24,09	0,35		
		<b>Rendimiento Etanol</b>			<b>0,468</b>



## CAPÍTULO 9: ANEXOS



Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

- Reactor conectado a una fuente de tensión de 2 V:

Tabla 13. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación conectado a 2V.

Reactor 3: Electrofermentación (2 V)					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	Ác. Acético (g/L)	Consumo glucosa	Formación EtOH
0	52,80	0,40	0,00		
2	51,61	0,91	0,00	0,149	0,063
4	38,83	6,77	0,00	1,597	0,733
8	10,50	19,01	0,00	7,081	0,765
23	0,00	22,99	0,12	0,175	0,066
25	0,00	22,45	0,13		
			<b>Rendimiento Etanol</b>		<b>0,435</b>

- Reactor conectado a una fuente de tensión de 4 V:

Tabla 14. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación conectado a 4V.

Reactor 4: Electrofermentación (4 V)					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	Ác. Acético (g/L)	Consumo glucosa (g/h)	Formación EtOH (g/h)
0	54,89	0,35	0,00		
2	52,42	0,91	0,00	0,309	0,070
4	47,59	4,25	0,36	0,603	0,417
6	28,59	12,24	0,00	2,376	0,999
8	9,30	21,01	0,00	2,411	1,096
10	0,00	23,74	0,21	1,163	0,342
24	0,00	24,27	0,00		
			<b>Rendimiento Etanol</b>		<b>0,442</b>



- Reactor conectado a una fuente de tensión de 6 V:

Tabla 15. Resultados de las muestras del reactor durante la fermentación conectado a 6V.

Reactor 5: Electrofermentación (6 V)					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	Ác. Acético (g/L)	Consumo glucosa (g/h)	Formación EtOH (g/h)
0	54,83	0,41	0,00		
2	52,77	0,56	0,00	0,257	0,019
4	48,05	3,09	0,00	0,591	0,317
6	37,44	8,91	0,00	1,327	0,728
8	20,06	15,74	0,00	2,172	0,853
10	3,62	22,97	0,00	2,055	0,904
24	0,00	21,54	0,39		
			<b>Rendimiento Etanol</b>		<b>0,419</b>

## 9.2 Datos recopilados durante los ensayos con el sistema desarrollado

- Reactor con electrodos excitados con 2V durante 24 horas:

Tabla 16. Resultados de las muestras del reactor excitado con 2V durante 24 horas

Reactor 6. Escalón -2V- desde t=0 hasta t=24 h					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	A (600 nm)	Consumo glucosa (g/h)	Formación EtOH (g/h)
0,00	52,14	0,53	0,098		
1,83	50,08	1,34	0,104	0,281	0,111
3,83	44,00	4,27	2,984	0,760	0,366
5,83	31,79	10,10	7,110	1,527	0,728
7,83	9,04	20,71	12,040	2,844	1,327
9,83	0,00	24,35	13,000	1,130	0,455
23,83	0,00	23,95	13,740		
			<b>Rendimiento Etanol</b>		<b>0,467</b>



## CAPÍTULO 9: ANEXOS



Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

- Reactor con electrodos excitados con una rampa de 0 a 2 V durante 6 horas y 2 V mantenido hasta 24 horas

Tabla 17. Resultados de las muestras del reactor excitado con una rampa de 0 a 2V durante 6 horas y 2V mantenido hasta 24 horas

Reactor 7. Rampa de 0 a 2 V (t=0 hasta t=6 h) y mantenimiento 2 V hasta 24 h					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	A (600 nm)	Consumo glucosa (g/h)	Formación EtOH (g/h)
0,00	51,81	0,47	0,065		
2,17	51,10	1,67	0,341	0,082	0,139
3,42	44,79	3,51	2,816	1,262	0,368
5,42	31,24	10,99	7,000	1,693	0,935
7,92	9,09	20,31	8,050	2,215	0,932
9,92	0,00	24,66	13,980	1,137	0,544
24,00	0,00	24,11	14,600		
			<b>Rendimiento Etanol</b>		<b>0,476</b>

- Reactor con electrodos excitados con una rampa de 0 a 2 V durante 10 horas y 2 V mantenido hasta 24 horas:

Tabla 18. Resultados de las muestras del reactor excitado con una rampa de 0 a 2V durante 10 horas y 2V mantenido hasta 24 horas

Reactor 8. Rampa de 0 a 2 V (t=0 hasta t=10 h) y mantenimiento 2 V hasta 24 h					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	A (600 nm)	Consumo glucosa (g/h)	Formación EtOH (g/h)
0	50,36	0,43	0,198		
2,08	50,31	1,14	0,360	0,006	0,085
3,75	46,04	4,26	1,380	0,640	0,468
5,92	28,86	11,81	7,870	1,979	0,870
8,08	9,85	20,66	12,740	2,200	1,024
9,75	0,10	24,83	13,900	1,460	0,624
23,75	0,00	24,60	13,020		
			<b>Rendimiento Etanol</b>		<b>0,493</b>



## CAPÍTULO 9: ANEXOS



Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

- Reactor con electrodos excitados con un ciclo de 0 a 2 V con 0.01 V/s y 200 ciclos:

Tabla 19. Resultados de las muestras del reactor excitado con un ciclo de 0 a 2V con 0.01V/s y 200 ciclos

Reactor 9. Ciclo de 0 a 2 V con 0,01 V/s y 200 ciclos					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	A (600 nm)	Consumo glucosa (g/h)	Formación EtOH (g/h)
0	53,30	0,44	0,14		
1,75	51,44	0,95	0,65	0,266	0,073
3,92	43,82	4,80	3,54	0,878	0,443
5,75	27,13	13,00	8,27	2,280	1,121
7,42	13,72	18,79	14,26	2,009	0,867
9,75	0,00	24,75	15,64	1,472	0,639
23,5	0,00	24,35	16,34		
			<b>Rendimiento Etanol</b>		<b>0,464</b>

- Reactor con electrodos excitados con pulso diferencial de 0 a 3 V, con pulso de amplitud 0,5 V, incremento 0,02 V, ancho de pulso 60 segundos, periodo 160 segundos y voltaje y tiempo final de 2V y 24 horas:

Tabla 20. Resultados de las muestras del reactor excitado con pulso diferencial de 0 a 3 V, con pulso de amplitud 0,5V, incremento de pulso 0,02, ancho de pulso 60 segundos, periodo 160 segundos y voltaje y tiempo final de 2V y 24 horas

Reactor 10. Pulso diferencial (V0=0; V1=voltaje final(2V))					
t (h)	Glucosa (g/L)	Etanol (g/L)	A (600 nm)	Consumo glucosa (g/h)	Formación EtOH (g/h)
0	52,04	0,39	0,30		
2,17	52,17	1,07	0,69	-0,014	0,078
4,17	46,36	4,03	2,71	0,726	0,370
6,17	33,54	9,90	7,42	1,602	0,735
7,83	15,02	18,14	12,64	2,790	1,240
9,58	6,41	22,00	14,66	1,230	0,551
23,67	0,00	23,79	15,24	0,114	0,032
			<b>Rendimiento Etanol</b>		<b>0,457</b>

### 9.3 Corriente medida durante los ensayos con el sistema desarrollado

- Reactor con electrodos excitados con 2V durante 24 horas:

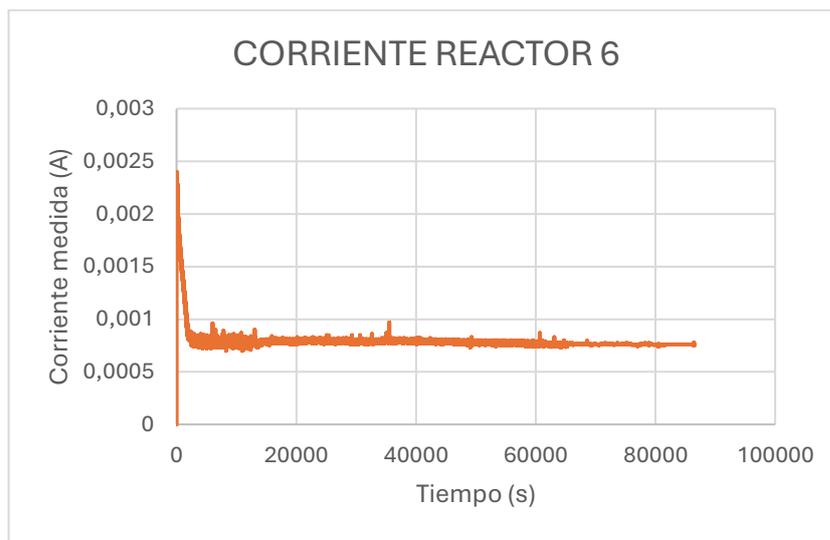


Ilustración 86. Corriente medida en el reactor excitado con 2V durante 24 horas

- Reactor con electrodos excitados con una rampa de 0 a 2 V durante 6 horas y 2 V mantenido hasta 24 horas:

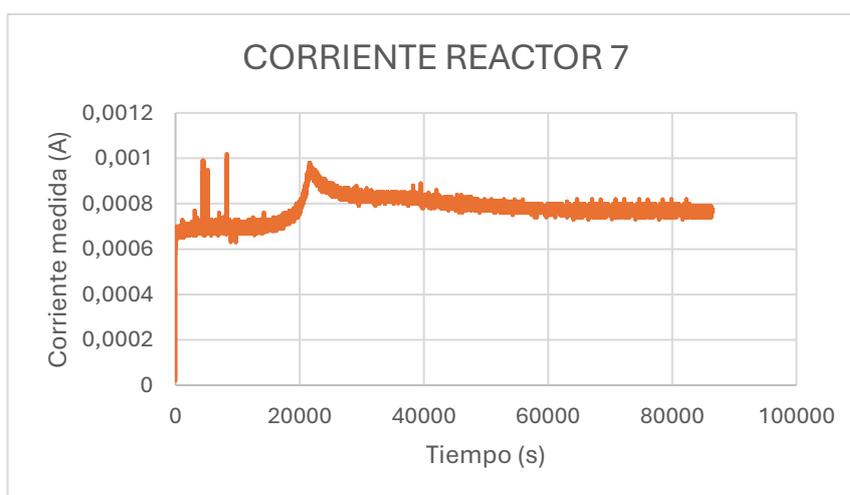


Ilustración 87. Corriente medida en el reactor excitado con una rampa de 0 a 2V durante 6 horas y 2V mantenido hasta 24 horas

- Reactor con electrodos excitados con una rampa de 0 a 2 V durante 10 horas y 2 V mantenido hasta 24 horas:

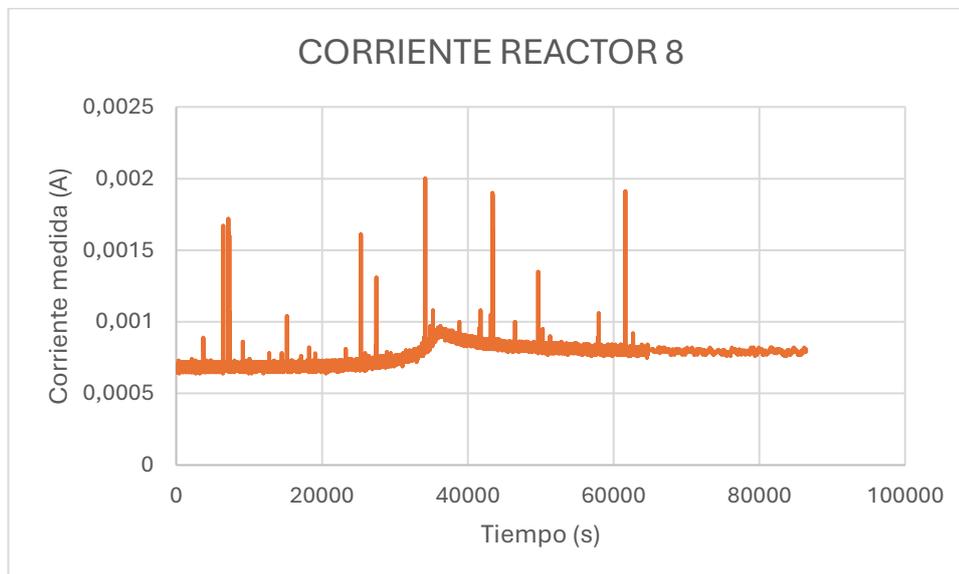


Ilustración 88. Corriente medida en el reactor excitado con una rampa de 0 a 2V durante 10 horas y 2V mantenido hasta 24 horas

- Reactor con electrodos excitados con un ciclo de 0 a 2 V con 0.01 V/s y 200 ciclos:

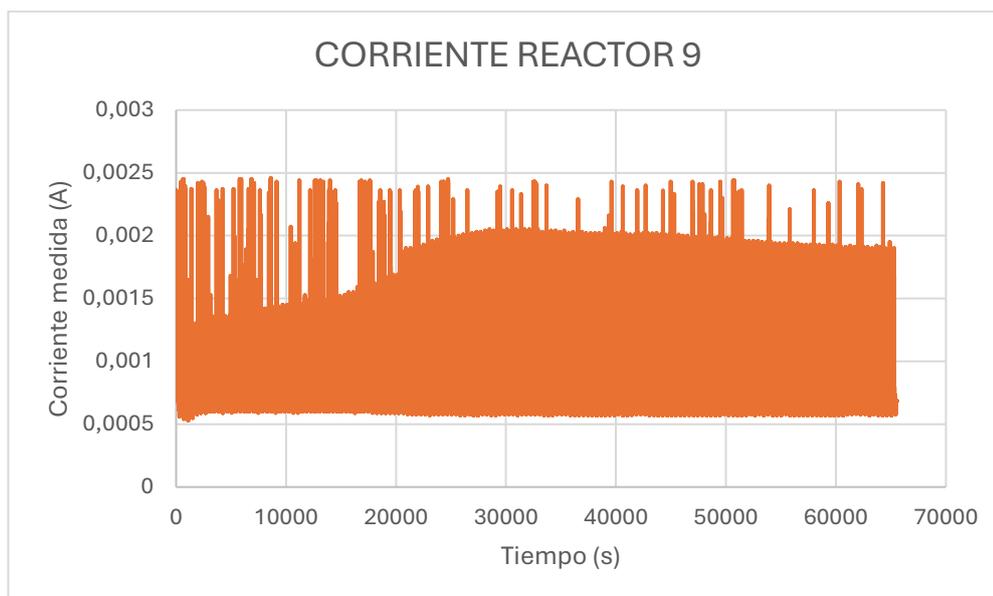


Ilustración 89. Corriente medida en el reactor excitado con un ciclo de 0 a 2 V con 0.01 V/s y 200 ciclos

- Reactor con electrodos excitados con pulso diferencial de 0 a 3 V, con pulso de amplitud 0,5V, incremento de pulso 0,02, ancho de pulso 60 segundos, periodo 160 segundos y voltaje y tiempo final de 2V y 24 horas:

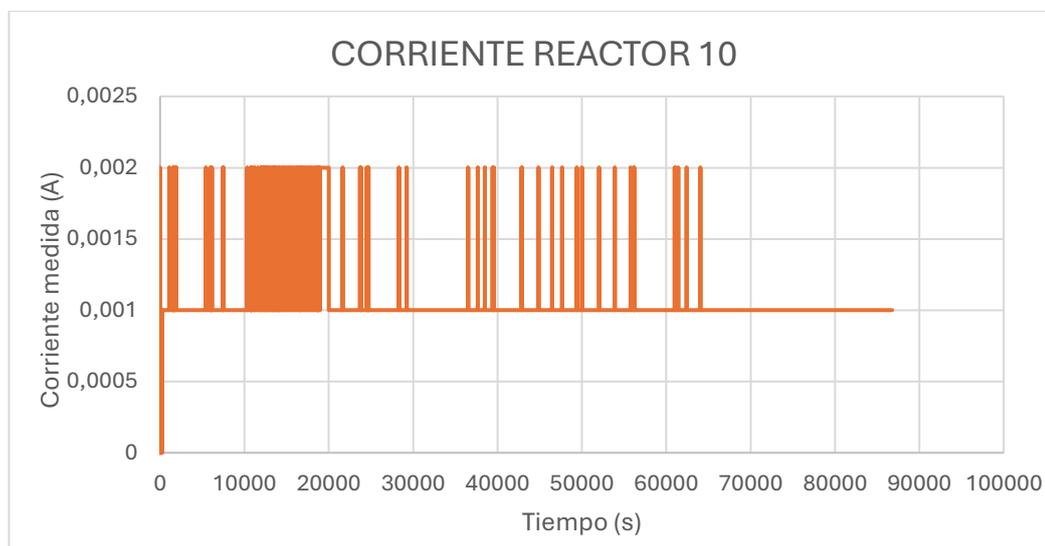


Ilustración 90. Corriente medida en el reactor excitado con pulso diferencial de 0 a 3 V, con pulso de amplitud 0,5V, incremento de 0,02, ancho de pulso 60 segundos, periodo 160 segundos y voltaje y tiempo final de 2V y 24 horas:

### 9.4 Manual de usuario

A continuación, se presenta el manual de usuario, cuyo propósito es ofrecer una guía para el uso del programa. Este manual tiene como objetivo capacitar a los usuarios para que puedan operar el programa de manera autónoma y sin dificultades, independientemente de su nivel de conocimiento de LabVIEW.

#### **PASO 1:** Conexiones con la tarjeta y la PCB.

El electrodo que actuará como ánodo debe conectarse a la salida configurada en el bloque *DAQ Assistant* de Voltaje Aplicado (por ejemplo, en los ensayos se utilizó el A00). Por su parte, el terminal IN+ de la PCB debe conectarse al electrodo que funcionará como cátodo.

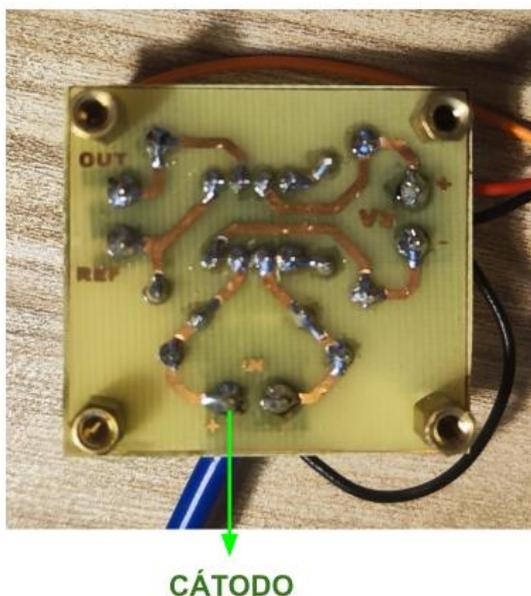


Ilustración 91. Manual de usuario: Terminal IN+ de la PCB, donde se conecta el electrodo que actuará de cátodo.

### PASO 2: Abrir el programa INICIO.vi en LabVIEW

Al abrir el programa, aparecerá la ventana de la ilustración 92, donde el usuario podrá iniciar un nuevo experimento pulsando el botón “Comenzar”. En caso contrario, podrá cerrar el programa seleccionando la opción “Salir” en la esquina superior derecha.



Ilustración 92. Manual de usuario: Panel frontal de la pantalla de Inicio.

### PASO 3: Pulsar “Comenzar” en la pantalla de INICIO.vi

Al pulsar el botón “Comenzar” en el programa de inicio, se abrirá el programa FORMASDEONDA.vi, mostrado en la ilustración 93. En esta interfaz, el usuario podrá visualizar las diferentes formas de onda disponibles: Escalón, Rampa, Onda Cíclica, Onda Cuadrada y Pulso Diferencial. Al seleccionar cualquiera de estas opciones, el programa redirigirá al usuario al programa correspondiente para configurar y ejecutar el experimento. Además, en la esquina superior derecha, se proporciona la opción de regresar a la pantalla anterior o cerrar los programas.

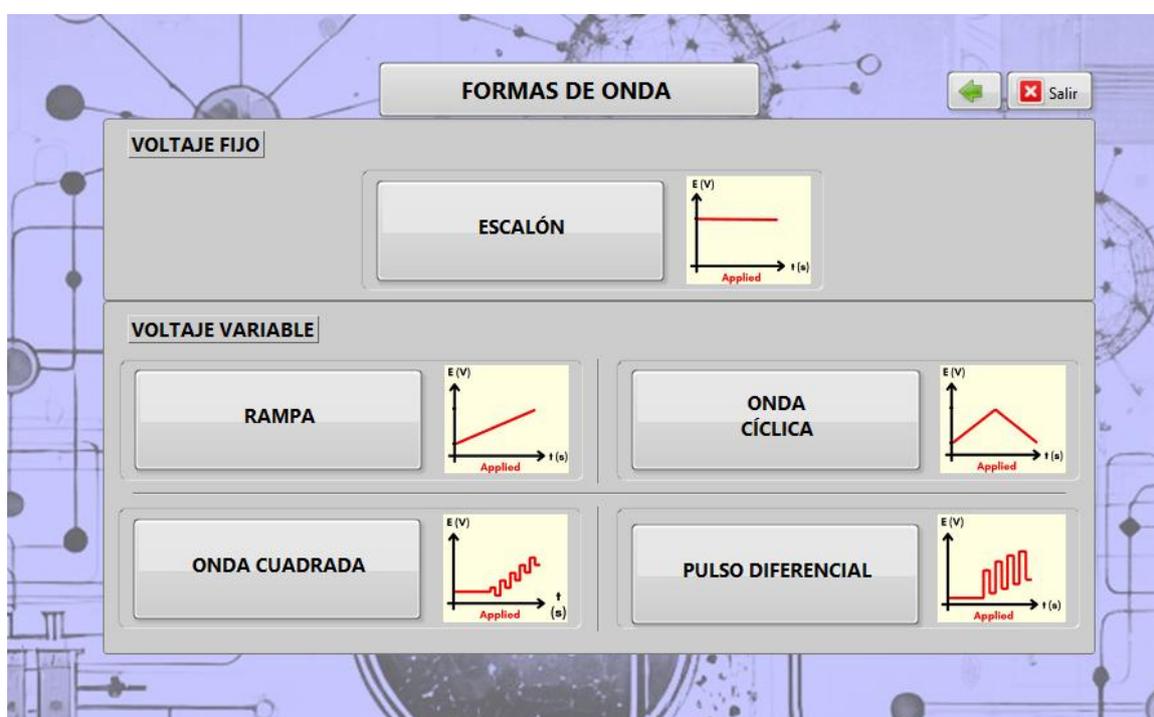


Ilustración 93. Manual de usuario: Panel frontal menú selección de forma de onda.

### PASO 4: Seleccionar la forma de onda con la que se desea experimentar. Por ejemplo, **Rampa**.

Aparecerá la pantalla mostrada en la ilustración 94, la cual es específica para cada forma de onda disponible. En esta pantalla, el usuario puede configurar el experimento y visualizar su evolución. En los pasos continuación, se detallan cada una de sus partes.



## CAPÍTULO 9: ANEXOS



Diseño de un sistema de excitación de electrodos de aplicación en procesos de electrofermentación

**FORMA DE ONDA: RAMPA** ✖ Salir

**ALMACENAMIENTO DE DATOS**  
Introduzca el nombre del archivo y la carpeta donde quiere que guarden los archivos  
**Nombre del archivo**   
**Carpeta**

**INFORMACIÓN ADICIONAL**  
Introduzca si desea algún comentario referente al experimento si lo considera necesario

**ELECTRODO CÁTODO**  
Tipo del electrodo usado en el cátodo  
  
Activar si este es el electrodo de trabajo   
Área del electrodo cm<sup>2</sup>

**ELECTRODO ÁNODO**  
Tipo del electrodo usado en el ánodo  
  
Activar si este es el electrodo de trabajo   
Área del electrodo cm<sup>2</sup>

**CONFIGURACIÓN DE LA ONDA**

VOLTAJE INICIAL E0 (V)

VOLTAJE FINAL E2 (V)

VOLTAJE FIN FERMENT. E1 (V)

TIEMPO FINAL T2 (s)

TIEMPO FERMENTACIÓN T1 (s)

COMENZAR EXPERIMENTO FINALIZAR EXPERIMENTO

**GRÁFICA VOLTAJE (V) - TIEMPO (s)**  
 V  S Plot 0

Amplitude

Time

**PORCENTAJE DEL EXPERIMENTO REALIZADO**  

0,00 %

**CONSUMO AMPERIOS (A) - TIEMPO (s)**  

0 A

CONSUMO  A

**CONCENTRACIONES MEDIDAS**

Tiempo 1	Concentracion 1	Tiempo 4	Concentracion 4	Tiempo 7	Concentracion 7
<input type="text"/>					
Tiempo 2	Concentracion 2	Tiempo 5	Concentracion 5	Tiempo 8	Concentracion 8
<input type="text"/>					
Tiempo 3	Concentracion 3	Tiempo 6	Concentracion 6	Tiempo 9	Concentracion 9
<input type="text"/>					

Ilustración 94. Manual de usuario: Panel Frontal forma de onda Rampa.

### PASO 5: Configuración del experimento.

Esta configuración se lleva a cabo en la sección superior de la ilustración anterior. En la ilustración 95 se muestra esta sección en detalle. Se deben definir varios parámetros, los cuales se explican a continuación.

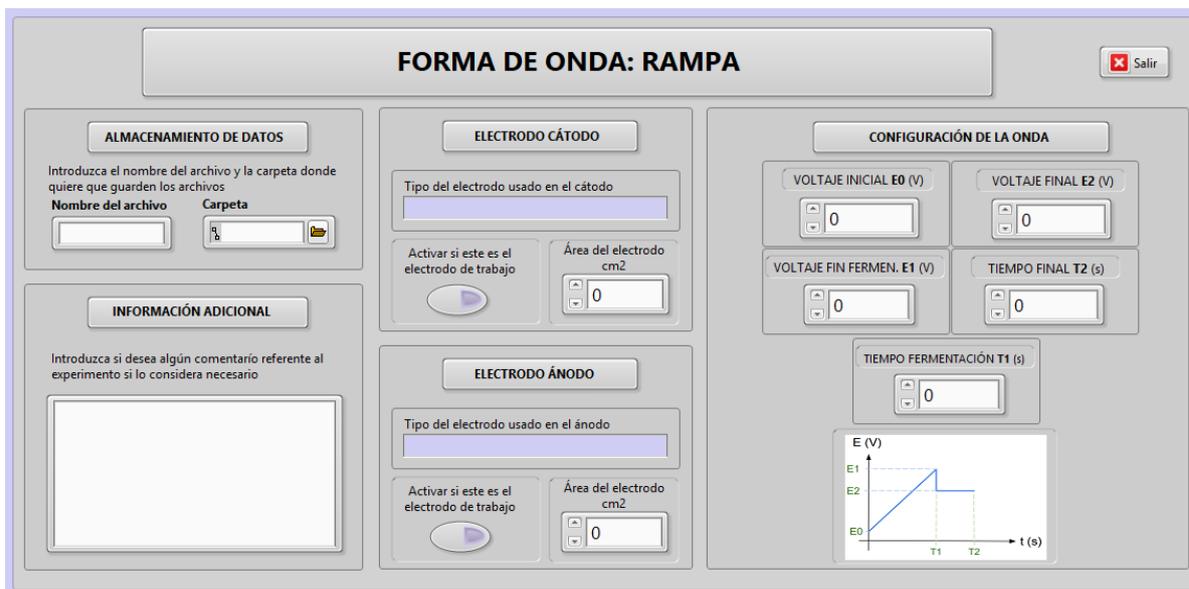


Ilustración 95. Manual de usuario: Sección del Panel Frontal donde se configura el experimento.

## ■ ALMACENAMIENTO DE DATOS:

En esta sección, el usuario debe especificar el nombre del archivo de Excel que se generará para almacenar los datos obtenidos durante la ejecución del programa. Además, debe definir la ruta de la carpeta en la que se guardará el archivo. Para ello, deberá hacer clic en el ícono de la carpeta y seleccionar la ubicación correspondiente.

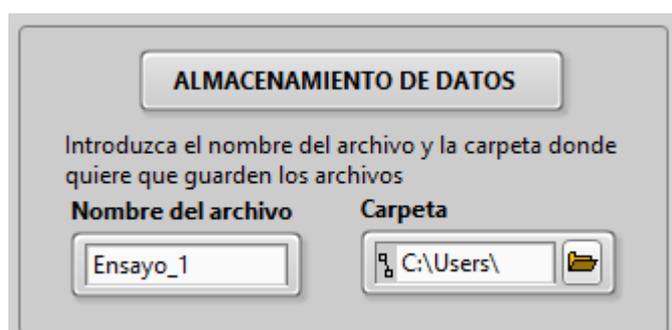


Ilustración 96. Manual de usuario: Ejemplo de almacenamiento de datos.

### ■ ELECTRODOS:

El usuario puede registrar en esta sección información relacionada con los electrodos. La ilustración 97 muestra un ejemplo de cómo completar estos datos. Es posible especificar el tipo de electrodo utilizado en el cátodo y en el ánodo, así como el área de ambos y cuál de ellos es el electrodo de trabajo, mediante el botón destinado a este propósito.

The screenshot displays a software interface for configuring electrodes. It is divided into two main sections: 'ELECTRODO CÁTODO' and 'ELECTRODO ÁNODO'.  
In the 'ELECTRODO CÁTODO' section:  
- A dropdown menu shows 'Grafito' selected.  
- A toggle button labeled 'Activar si este es el electrodo de trabajo' is currently turned off (yellow).  
- A numeric input field for 'Área del electrodo cm2' contains the value '2'.  
In the 'ELECTRODO ÁNODO' section:  
- A dropdown menu shows 'Platino' selected.  
- A toggle button labeled 'Activar si este es el electrodo de trabajo' is currently turned on (purple).  
- A numeric input field for 'Área del electrodo cm2' contains the value '4,5'.

Ilustración 97. Manual de usuario: Ejemplo de registro de la información relativa a los electrodos empleados.

### ■ CONFIGURACIÓN DE LA ONDA:

En esta parte, el usuario configura los parámetros necesarios para definir la forma de onda, los cuales varían según el tipo de onda. La ilustración 98 presenta un ejemplo de una posible configuración para la onda de Rampa.

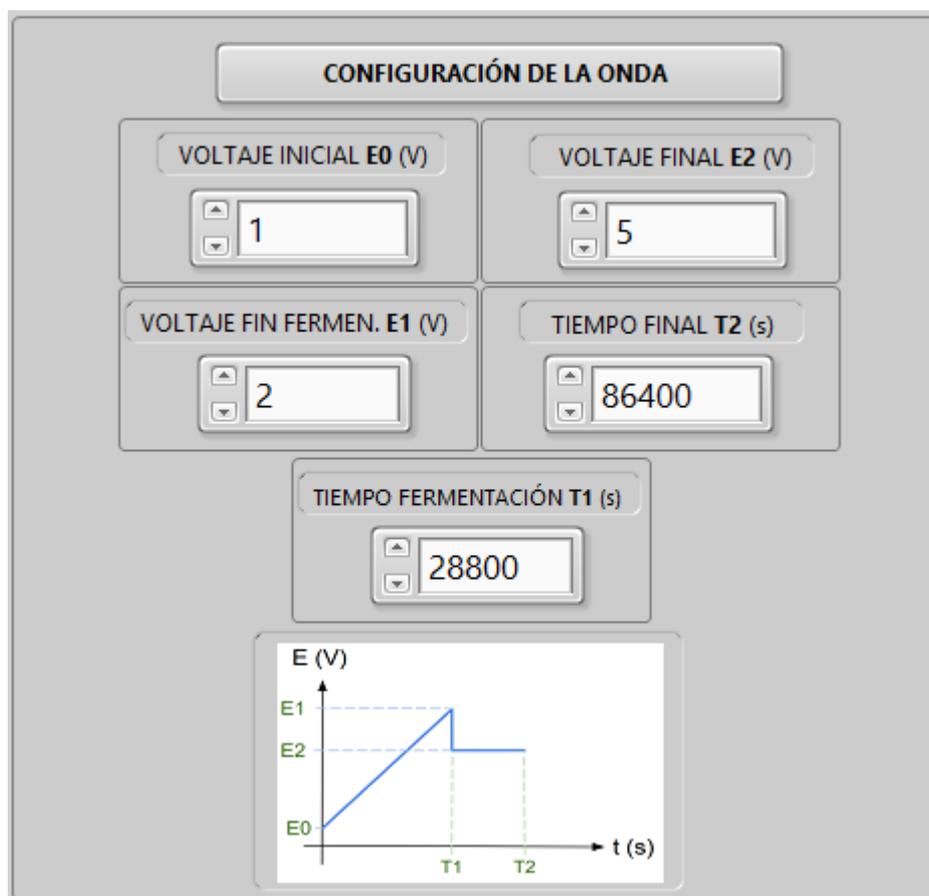


Ilustración 98. Manual de usuario: Ejemplo de configuración de la forma de onda Rampa.

### ■ INFORMACIÓN ADICIONAL:

El usuario también puede, si lo considera necesario, registrar información adicional que estime relevante sobre la ejecución del experimento en la sección de información adicional. En la ilustración 99 se presenta un ejemplo.



**INFORMACIÓN ADICIONAL**

Introduzca si desea algún comentario referente al experimento si lo considera necesario

Fermentación con *Saccharomyces cerevisiae*, matraz de vidrio de 250 ml a 35°C y 200rpm.

Ilustración 99. Manual de usuario: Ejemplo de información adicional de la configuración del experimento.

### **PASO 6:** Comenzar el experimento.

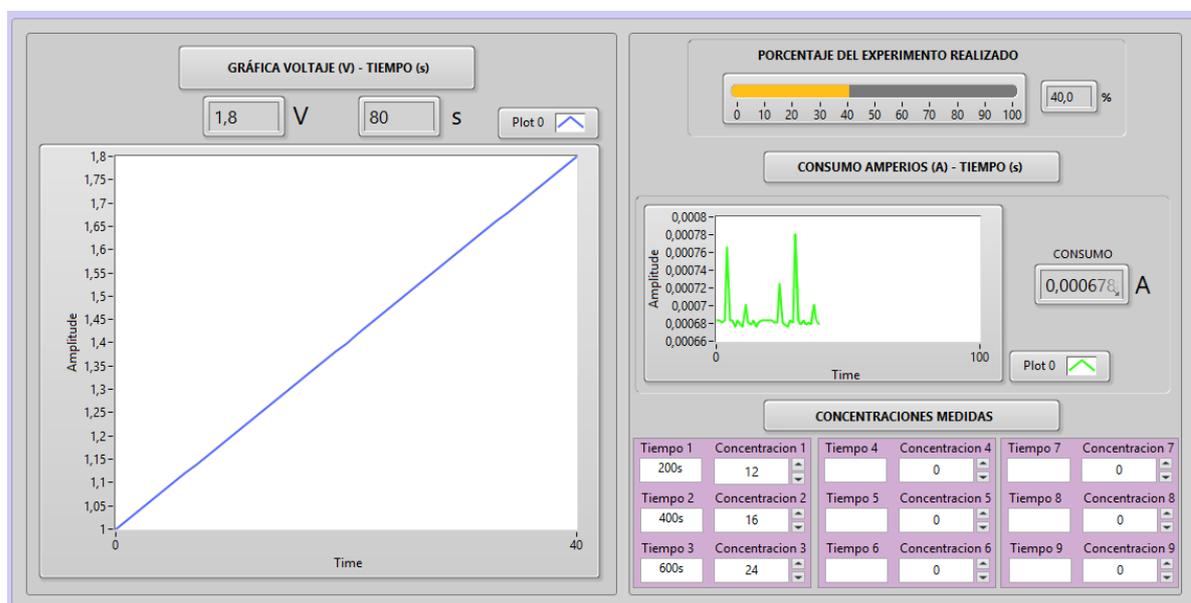
Una vez completada la configuración de los datos del experimento, se puede proceder a su ejecución. Para ello, el usuario debe pulsar en el botón "Comenzar", ubicado en el centro de la pantalla, tal como se muestra en la imagen siguiente. Al pulsarlo, el experimento comenzará de manera automática. A partir de ese momento, el usuario podrá desplazarse hacia la sección inferior de la pantalla 94, que se describirá a continuación.



Ilustración 100. Manual de usuario: Botón para comenzar el experimento.

### PASO 7: Seguimiento de la ejecución del experimento.

Una vez iniciado el experimento, el usuario puede consultar el nivel de avance de este a través de la sección del panel frontal mostrada en la ilustración 101. Esta sección proporciona diversas informaciones, como una gráfica que muestra la evolución del voltaje respecto al tiempo, el voltaje aplicado y el tiempo de ejecución. Además, debido a la larga duración de los experimentos, se ha incorporado un porcentaje de realización para indicar el progreso y dar una idea de cuánto falta por completar. Por otro lado, también se presenta una pantalla que muestra el consumo de corriente a lo largo del tiempo. En la sección inferior derecha, el usuario tiene la opción de introducir, si lo desea, los tiempos en los que se tomaron las muestras y la concentración obtenida.



*Ilustración 101. Manual de usuario: Sección de programa en la que se muestra la evolución del experimento.*

### PASO 8: Finalización de la ejecución del experimento.

El experimento finaliza cuando se completa la forma de onda configurada. Al finalizar, el programa almacenará automáticamente los datos en el archivo de Excel, guardará y cerrará dicho archivo. No obstante, también se ofrece al usuario la opción de cerrar el programa antes de que se complete la forma de onda, a través del botón “*Finalizar experimento*”, garantizando la salvaguarda de la información en el archivo Excel.



*Ilustración 102. Manual de usuario: Botón "Finalizar experimento"*

### PASO 9: Análisis de los valores obtenidos

Una vez completado el experimento, si el usuario desea analizar los resultados o consultar información al respecto, puede hacerlo a través del archivo Excel definido para este propósito. Este archivo se compondrá de tres hojas separadas: en la primera se registran los datos de configuración del experimento, en la segunda se encuentran los registros del voltaje aplicado y la corriente medida, y finalmente, en la tercera, se detallan los tiempos y concentraciones de las muestras tomadas.

- HOJA 1: DATOS EXPERIMENTO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	ELECTRODO DE TRABAJO	TIPO DE ELECTRODO USADO EN EL CÁTODO	ÁREA CÁTODO	TIPO DE ELECTRODO USADO EN EL ÁNODO	ÁREA ÁNODO	VOLTAJE INICIAL	VOLTAJE FINAL	VOLTAJE FIN FERMENTACIÓN	TIEMPO FERMENTACION	TIEMPO FINAL	INFORMACION ADICIONAL
2	CÁTODO	Grafito		2 Platino	4,5	1	5	2	28800	86400	Fermentación con <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , matraz de vidrio de 250 ml a 35°C y 200rpm.

*Ilustración 103. Manual de usuario: Ejemplo de visualización de los parámetros de configuración del experimento en el archivo Excel.*

- HOJA 2: VOLTAJE APLICADO

	A	B	C
1	TIEMPO	VOLTAJE	CORRIENTE
2	0	1	0,00068
3	2	1,02	0,00068
4	4	1,04	0,00089
5	6	1,06	0,00068
6	8	1,08	0,00069
7	10	1,1	0,00068
8	12	1,12	0,00068
9	14	1,14	0,00068
10	16	1,16	0,00068
11	18	1,18	0,00069
12	20	1,2	0,00068
13	22	1,22	0,00068
14	24	1,24	0,00068
15	26	1,26	0,00068
16	28	1,28	0,00068
17	30	1,3	0,00075

*Ilustración 104. Manual de usuario: Ejemplo de visualización de los voltajes aplicados e intensidades leídas en el archivo Excel.*



- HOJA 3: CONCENTRACIONES MEDIDAS

	A	B
1	TIEMPO	CONCENTRACION
2	200s	12
3	400s	16
4	600s	24
5		0
6		0
7		0
8		0
9		0
10		0

Ilustración 105. Manual de usuario: Ejemplo de visualización de las concentraciones medidas en el archivo Excel.