

# Contenido

|  |    |
|--|----|
| <b>Introducción</b> . . . . .                              | 1  |
| <b>Capítulo 1. Microalgas</b> . . . . .                    | 5  |
| 1.1. Definición . . . . .                                  | 5  |
| 1.2. Características . . . . .                             | 6  |
| 1.3. Aplicaciones de las microalgas . . . . .              | 7  |
| 1.3.1. Sector de la alimentación . . . . .                 | 7  |
| 1.3.2. Sector farmacéutico. . . . .                        | 7  |
| 1.3.3. Sector cosmético . . . . .                          | 7  |
| 1.3.4. Sector energético . . . . .                         | 8  |
| 1.3.5. Ámbito medioambiental . . . . .                     | 9  |
| 1.4. Sistema de cultivo de microalgas . . . . .            | 12 |
| 1.4.1. Sistemas abiertos . . . . .                         | 12 |
| 1.4.2. Sistemas cerrados “fotobiorreactores”. . . . .      | 14 |
| 1.5. Factores que influyen en el cultivo de algas. . . . . | 16 |
| 1.5.1. La luz . . . . .                                    | 16 |
| 1.5.2. La temperatura. . . . .                             | 17 |
| 1.5.3. El pH . . . . .                                     | 18 |
| 1.5.4. Los nutrientes . . . . .                            | 18 |
| 1.5.5. Salinidad del medio. . . . .                        | 20 |
| 1.5.6. Agitación . . . . .                                 | 20 |
| 1.5.7. Transferencia gas-líquido . . . . .                 | 21 |
| 1.6. Conclusión . . . . .                                  | 21 |

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Capítulo 2. Biofijación del CO<sub>2</sub></b> . . . . .                                | 23 |
| 2.1. Selección de la especie de microalgas . . . . .                                       | 24 |
| 2.1.1. Actividad fotosintética . . . . .   | 25 |
| 2.1.2. Mecanismo de concentración de CO <sub>2</sub> “MCC” . . . . .                       | 25 |
| 2.1.3. Elección de especies de algas . . . . .   | 26 |
| 2.2. Optimización del diseño del fotobiorreactor . . . . .                                 | 29 |
| 2.3. Conclusión . . . . .  | 30 |
| <br>   |    |
| <b>Capítulo 3. Modelado de bioprocesos</b> . . . . .                                       | 33 |
| 3.1. Modos de funcionamiento . . . . .   | 33 |
| 3.1.1. El por lotes . . . . .  | 33 |
| 3.1.2. El modo fed-batch . . . . .   | 35 |
| 3.1.3. El modo continuo . . . . .  | 35 |
| 3.2. Modelado de la velocidad de crecimiento . . . . .                                     | 37 |
| 3.2.1. Modelos generales . . . . .   | 37 |
| 3.2.2. Modelo de Droop . . . . .   | 38 |
| 3.2.3. Modelo relativo a la influencia de la luz . . . . .                                 | 39 |
| 3.2.4. Modelo relativo a la influencia del Carbono . . . . .                               | 41 |
| 3.2.5. Modelos que tratan sobre la influencia<br>simultánea de varios parámetros . . . . . | 41 |
| 3.2.6. Elección del modelo de crecimiento . . . . .  | 46 |
| 3.3. Modelos de balance de materia . . . . .   | 47 |
| 3.4. Identificación de los parámetros del modelo . . . . .                                 | 48 |
| 3.5. Ejemplo: Cultivo de <i>Chlorella vulgaris</i> . . . . .                               | 50 |
| 3.5.1. Dispositivo experimental . . . . .  | 50 |
| 3.5.2. Modelado . . . . .  | 53 |
| 3.5.3. Identificación paramétrica . . . . .  | 55 |
| 3.6. Conclusión . . . . .  | 61 |
| <br>   |    |
| <b>Capítulo 4. Estimación de la concentración celular</b> . . . . .                        | 63 |
| 4.1. Información general sobre la estimación. . . . .                                      | 63 |
| 4.2. Estado del arte . . . . .   | 66 |
| 4.3. Filtro de Kalman . . . . .  | 68 |
| 4.3.1. Principio . . . . .   | 68 |
| 4.3.2. Filtro de Kalman discreto . . . . .   | 69 |
| 4.3.3. Filtro de Kalman extendido discreto . . . . .                                       | 71 |
| 4.3.4. Ajuste del filtro de Kalman . . . . .   | 72 |
| 4.3.5. Ejemplo de aplicación . . . . .   | 73 |
| 4.4. Observador asintótico . . . . .   | 75 |

---

|   |            |
|---|------------|
| 4.4.1. Principio . . . . .  | 75         |
| 4.4.2. Ejemplo de aplicación . . . . .                                    | 76         |
| 4.5. Observador por intervalos . . . . .                                  | 78         |
| 4.5.1. Principio . . . . .  | 78         |
| 4.5.2. Ejemplo de aplicación . . . . .                                    | 80         |
| 4.6. Aplicación al cultivo de <i>Chlorella vulgaris</i> . . . . .         | 89         |
| 4.7. Conclusión . . . . .   | 92         |
| <b>Capítulo 5. Control del bioproceso . . . . .</b>                       | <b>95</b>  |
| 5.1. Determinación de las condiciones óptimas de funcionamiento . . . . . | 95         |
| 5.1.1. Condiciones de operación óptimas . . . . .                         | 96         |
| 5.1.2. Punto óptimo de funcionamiento . . . . .                           | 96         |
| 5.2. Información general sobre el control del sistema. . . . .            | 97         |
| 5.3. Estado del arte . . . . .  | 99         |
| 5.4. Control por modelo genérico (GMC). . . . .                           | 101        |
| 5.4.1. Principio . . . . .  | 101        |
| 5.4.2. Ventajas y desventajas . . . . .                                   | 102        |
| 5.4.3. Ejemplo de aplicación . . . . .                                    | 103        |
| 5.5. Control de linealización de entrada/salida . . . . .                 | 104        |
| 5.5.1. Principio . . . . .  | 104        |
| 5.5.2. Ventajas y desventajas . . . . .                                   | 106        |
| 5.5.3. Ejemplo de aplicación . . . . .                                    | 107        |
| 5.6. Control predictivo no lineal . . . . .                               | 108        |
| 5.6.1. Principio . . . . .  | 108        |
| 5.6.2. Control predictivo no lineal (CPNL). . . . .                       | 110        |
| 5.6.3. Ventajas y desventajas . . . . .                                   | 114        |
| 5.6.4. Ejemplo de aplicación . . . . .                                    | 115        |
| 5.7. Aplicación al cultivo de <i>Chlorella vulgaris</i> . . . . .         | 120        |
| 5.7.1. Rendimiento del control GMC . . . . .                              | 121        |
| 5.7.2. Rendimiento de control predictivo . . . . .                        | 124        |
| 5.8. Conclusión . . . . .   | 128        |
| <b>Conclusión . . . . .</b>   | <b>131</b> |
| <b>Bibliografía . . . . .</b>   | <b>135</b> |
| <b>Índice alfabético . . . . .</b>  | <b>149</b> |