

# Tabla de Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación . . . . .   | 1         |
| 1.2. Descripción del problema general . . . . .                       | 3         |
| 1.3. Hipótesis . . . . .  | 3         |
| 1.4. Objetivos generales y específicos . . . . .                      | 3         |
| 1.5. Contribuciones . . . . .   | 4         |
| <b>2. Estado del Arte – Revisión Bibliográfica</b>                    | <b>7</b>  |
| 2.1. Proceso fermentativo . . . . .                                   | 7         |
| 2.1.1. Metabolismo overflow . . . . .                                 | 8         |
| 2.1.2. Modelo matemático del biorreactor . . . . .                    | 9         |
| 2.2. Estrategias de control en cultivos de alta densidad . . . . .    | 14        |
| 2.2.1. Control por linealización por retroalimentación . . . . .      | 16        |
| 2.2.2. Control Adaptable . . . . .                                    | 16        |
| 2.3. Observadores en cultivos de alta densidad . . . . .              | 20        |
| 2.3.1. Sensores para $O_2$ , $CO_2$ y sustrato . . . . .              | 21        |
| 2.3.2. Observadores de biomasa . . . . .                              | 22        |
| 2.3.3. Observadores de producto y velocidad de crecimiento . . . . .  | 22        |
| 2.4. Cálculo Fraccionario . . . . .                                   | 23        |
| 2.4.1. Conceptos generales de cálculo fraccionario . . . . .          | 23        |
| 2.4.2. Observadores fraccionarios . . . . .                           | 25        |
| 2.5. Conclusiones . . . . .   | 26        |
| <b>3. Diseños de estrategias de control para ADC</b>                  | <b>28</b> |
| 3.1. Estrategia de control para la velocidad de crecimiento . . . . . | 28        |
| 3.2. Análisis de estabilidad del error de control . . . . .           | 30        |
| 3.3. Control de oxígeno disuelto . . . . .                            | 31        |
| 3.4. Optimización de los parámetros de los controladores . . . . .    | 33        |
| 3.5. Esquemas propuestos de lazos de control . . . . .                | 35        |
| 3.6. Conclusiones . . . . .   | 37        |
| <b>4. Diseño de observadores para ADC</b>                             | <b>38</b> |
| 4.1. Introducción . . . . .   | 38        |
| 4.2. Observador Asintótico . . . . .                                  | 39        |
| 4.3. Observador Híbrido . . . . .                                     | 40        |
| 4.4. Observador de velocidad de crecimiento . . . . .                 | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.5. Observador fraccionario de velocidad de crecimiento . . . . .  | 47        |
| 4.6. Análisis de Observabilidad . . . . .   | 47        |
| 4.7. Análisis de estabilidad del error de estimación . . . . .  | 52        |
| 4.8. Optimización de los parámetros de los observadores . . . . .   | 53        |
| <b>5. Simulaciones y análisis de Resultados</b>   | <b>54</b> |
| 5.1. Condiciones de simulación . . . . .  | 54        |
| 5.1.1. Función del flujo de alimentación en lazo abierto . . . . .  | 55        |
| 5.1.2. Índices de desempeño . . . . .   | 56        |
| 5.1.3. Aproximaciones <i>smooth</i> . . . . .   | 57        |
| 5.2. Desempeño del observador híbrido a lazo abierto . . . . .  | 58        |
| 5.2.1. Comportamiento del observador híbrido en el régimen respirativo . .  | 59        |
| 5.2.2. Comportamiento del observador híbrido en el régimen respiro-fermentativo                                   | 60        |
| 5.2.3. Evaluación de robustez del observador híbrido . . . . .  | 61        |
| 5.3. Desempeño de la estrategia de control de etanol con observador híbrido . . .                                 | 70        |
| 5.4. Desempeño de la estrategia de control de velocidad de crecimiento con obser-<br>vador fraccionario . . . . . | 73        |
| 5.5. Comparación de diferentes estrategias de control de alta densidad . . . . .                                  | 87        |
| <b>Conclusiones</b>   | <b>89</b> |
| <b>Publicaciones</b>  | <b>92</b> |
| <b>Nomenclatura</b>   | <b>94</b> |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>98</b> |