

# Índice general

<b>Lista de símbolos</b>	<b>XVII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XIX</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XXI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	3
1.4. Hipótesis . . . . .	3
1.5. Aportaciones . . . . .	4
1.6. Límites y alcance de la tesis . . . . .	4
1.7. Organización de la tesis . . . . .	4
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>7</b>
2.1. Antecedentes y desarrollo de las pinzas ópticas . . . . .	7
2.1.1. Descripción general . . . . .	8
2.1.2. Composición básica de una pinza óptica . . . . .	10
2.1.3. Aplicaciones . . . . .	10
2.2. Fundamentos teóricos . . . . .	13
2.2.1. Teoría de Lyapunov . . . . .	13
2.2.2. Platitude diferencial . . . . .	18
<b>3. Física de la pinza óptica</b>	<b>21</b>
3.1. Fuerzas ópticas . . . . .	21
3.1.1. Origen de las fuerzas de captura óptica . . . . .	22

3.2.	Modelos teóricos . . . . .	24
3.2.1.	Modelo de la óptica de rayos o geométrica . . . . .	25
3.2.2.	Modelo de campo electromagnético . . . . .	25
3.3.	Modelo de la trampa óptica . . . . .	25
3.3.1.	Modelos elementales . . . . .	25
3.3.2.	Modelo base . . . . .	27
<b>4.</b>	<b>Control mediante platitud diferencial</b>	<b>31</b>
4.1.	Introducción . . . . .	31
4.2.	Modelo dinámico de la pinza óptica . . . . .	32
4.3.	Estrategia de control retroalimentado . . . . .	34
4.3.1.	Enfoque de asignación de polos basado en platitud diferencial . . . . .	35
4.4.	Resultados de la simulación . . . . .	37
4.4.1.	Seguimiento de una línea recta . . . . .	37
4.4.2.	Seguimiento una trayectoria elíptica . . . . .	38
4.4.3.	Manipulación desde una posición inicial en reposo a una posición final en reposo . . . . .	38
<b>5.</b>	<b>Control en presencia de ruido térmico</b>	<b>41</b>
5.1.	Introducción . . . . .	41
5.2.	Modelo dinámico no lineal de la pinza óptica . . . . .	42
5.3.	Estabilización del sistema de la pinza óptica . . . . .	44
5.3.1.	Estrategia de control donde el coeficiente de amortiguamiento es conocido . . . . .	44
5.3.2.	Estrategia de control donde el coeficiente de amortiguamiento es desconocido . . . . .	46
5.4.	Simulaciones numéricas . . . . .	49
5.4.1.	Simulación del primer enfoque . . . . .	49
5.4.2.	Simulación del segundo enfoque . . . . .	50
5.4.3.	Estabilización en presencia de ruido térmico . . . . .	52
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>57</b>
6.1.	Conclusiones del Capítulo 4 . . . . .	57
6.2.	Conclusiones del Capítulo 5 . . . . .	58
6.3.	Conclusión . . . . .	58

<b>A. Demostraciones, pruebas y comentarios</b>	<b>59</b>
A.1. Demostración del Lema 4.3.1 . . . . .	59
A.2. Demostración de la Proposición 4.3.1 . . . . .	60
A.3. Prueba de estabilidad de los sistemas (A.6) y (A.7) . . . . .	61
A.4. Implementación del método Newton-Raphson . . . . .	61
A.5. Consideraciones del método Newton-Raphson . . . . .	62
A.6. Demostración del Lema 5.3.1 . . . . .	62
<b>B. Publicaciones y congresos</b>	<b>65</b>
B.1. Publicaciones en libros . . . . .	65
B.2. Publicaciones en revistas . . . . .	65
B.3. Participación en congresos . . . . .	66
B.4. Participación en simposios . . . . .	66
<b>C. Distinción derivada del proyecto de investigación</b>	<b>67</b>
C.1. Distinción del Instituto Politécnico Nacional . . . . .	67
<b>Glosario</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>75</b>

# Lista de símbolos

$a, b$	Parámetros concernientes a la dimensión de la cintura del rayo.
$d$	Diámetro de la partícula.
$e_x$	Error de seguimiento para la componente $x$ .
$e_y$	Error de seguimiento para la componente $y$ .
$E_p$	Energía potencial.
$E_c$	Energía cinética.
$k_1, k_2$	Ganancias.
$k_B$	Constante de Boltzman = $1.38 \times 10^{-23}$ J/K.
$m$	Masa de la partícula.
$p_0$	Profundidad del pozo.
$r_T$	Radio de la trampa óptica.
$T$	Temperatura absoluta.
$x$	Posición en el eje $x$ de la partícula.
$y$	Posición en el eje $y$ de la partícula.
$\beta$	Coefficiente de amortiguamiento.
$\eta$	Señal de ruido blanco.
$\lambda$	Longitud de onda.
$\det(\cdot)$	Determinante de una matriz.
$\sigma_M(\cdot)$	Función de saturación.
$\text{sign}(\cdot)$	Función signo.
$V(\cdot)$	Función candidata de Lyapunov.
$\square$	Designación para el fin de las pruebas.
$f'(\cdot)$	Primera derivada de la función $f$ .
$\forall$	Para todo.
$\in$	Pertenece a.
$\subset$	Subconjunto de.
$\rightarrow$	Tiende a.
$\Rightarrow$	Implica.
$\ x\ $	Norma de $x$ .

$ a $	Valor absoluto de $a$ .
máx	Máximo.
exp, $e$	$e = 2.71828$ .

**Superíndices**

'	Primera derivada.
''	Segunda derivada.

**Acrónimos**

ADN	Ácido desoxirribonucleico.
CL	Respuesta en lazo cerrado (CLOse loop).
OP	Respuesta en lazo abierto (OPen loop).
PO	Pinza óptica.
SEM	Microscopio electrónico de barrido.
TEM	Microscopio electrónico de transmisión.

# Índice de figuras

1.1. TEM (a, b, y c) imágenes de nanopartículas de sílice mesoporoso con un diámetro exterior promedio de: (a) 20nm, (b) 45nm, y (c) 80nm. SEM (d) la imagen que corresponde a (b). Las inserciones tienen un gran aumento de las partículas de sílice mesoporoso. . . . .	6
2.1. Una pinza óptica es un dispositivo capaz de manipular micro o nanopartículas con gran precisión y sin infringirles daño. . . . .	9
2.2. Composición básica de una pinza óptica. . . . .	11
2.3. En los extremos de una molécula de ADN son adheridas esferas de látex las cuales son atrapadas y manipuladas usando pinzas ópticas. . . . .	13
3.1. Esquema general de una pinza óptica. . . . .	21
3.2. Fuerzas involucradas en la captura óptica. . . . .	22
3.3. Levitación óptica . . . . .	24
3.4. La pinza óptica se puede modelar como un resorte. . . . .	26
4.1. Diagrama de bloques para el control de la pinza óptica para la manipulación de partículas de escala nano y micrométrica. . . . .	32
4.2. Seguimiento retroalimentado de una línea recta. . . . .	38
4.3. Controlador retroalimentado para el seguimiento de una trayectoria elíptica. . . . .	39
4.4. Respuesta de lazo cerrado del controlador retroalimentado para la manipulación de posición. . . . .	40

- 5.1. Respuesta de la primera estrategia de control del sistema de la PO en lazo cerrado. Por comparación, la respuesta en lazo abierto correspondiente es mostrada como una línea punteada. Como se esperaba, la respuesta en lazo cerrado supera la respuesta en lazo abierto. . . . . 51
- 5.2. Respuesta de la segunda estrategia de control del sistema de la PO en lazo cerrado en una tarea de estabilización. Como podemos ver es sistema efectivamente alcanza la posición final,  $(x_f = 0, y_f = 0)$ . . . . . 52
- 5.3. Respuesta en lazo cerrado del sistema de la PO para la primera estrategia de control con la correspondiente respuesta en lazo abierto (línea punteada), donde el sistema de la PO es sujeto a fuerzas térmicas externas. . . . . 54
- 5.4. Respuesta en lazo cerrado del sistema de la PO para el segundo controlador en comparación con la correspondiente respuesta en lazo abierto (línea punteada), donde las fuerzas térmicas externas se presentan en el modelo. . . . . 54
- 5.5. Comparación de la respuesta en lazo cerrado de las dos estrategias de control para el cambio de posición de la PO en presencia de ruido térmico. . . . . 55

# Índice de tablas

4.1. Transformaciones escalares. . . . .	33
4.2. Parámetros para la simulación del experimento de manipulación desde una posición inicial a una final en reposo usando el enfoque de <i>platitude diferencial</i> . . . . .	40
5.1. Parámetros del sistema físico . . . . .	50