

# **Sistemas Inteligentes**

## **SUDOKU con solucionador**

### **Tarea 9 extra**

**Alumno:** Andres Soria Cabrera 421114409

**Profesor:** Rosas Hernández Javier

**Grupo:** 1754

**Fecha:** December 9, 2025

Facultad de Estudios Superiores Acatlán  
Universidad Nacional Autónoma de México

Repositorio: <https://github.com/Andark11/SUDOKU>

## Abstract

Este documento presenta la implementación de un solucionador de Sudoku interactivo que utiliza tres diferentes enfoques algorítmicos: Búsqueda en Profundidad (DFS), Búsqueda en Anchura (BFS) y Algoritmos Genéticos (GA). El sistema permite generar puzzles aleatorios con diferentes niveles de dificultad y compara el rendimiento de cada algoritmo en términos de tiempo de ejecución.

## Contents

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Características del Sistema</b>	<b>3</b>
2.1	Funcionalidades Principales . . . . .	3
2.2	Niveles de Dificultad . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Algoritmos Implementados</b>	<b>3</b>
3.1	DFS - Búsqueda en Profundidad . . . . .	3
3.1.1	Descripción . . . . .	3
3.1.2	Características . . . . .	4
3.1.3	Pseudocódigo . . . . .	4
3.2	BFS - Búsqueda en Anchura . . . . .	4
3.2.1	Descripción . . . . .	4
3.2.2	Características . . . . .	4
3.2.3	Pseudocódigo . . . . .	5
3.3	GA - Algoritmo Genético . . . . .	5
3.3.1	Descripción . . . . .	5
3.3.2	Componentes Principales . . . . .	5
3.3.3	Parámetros del Algoritmo . . . . .	6
3.3.4	Pseudocódigo . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Estructura del Proyecto</b>	<b>7</b>
4.1	Organización de Archivos . . . . .	7
4.2	Estrategias de Resolución . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Uso del Sistema</b>	<b>8</b>
5.1	Instalación . . . . .	8
5.2	Flujo de Ejecución . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Resultados y Análisis de Rendimiento</b>	<b>9</b>
6.1	Comparación de Algoritmos . . . . .	9
6.2	Ventajas y Desventajas . . . . .	9
6.2.1	DFS . . . . .	9
6.2.2	BFS . . . . .	9
6.2.3	Algoritmo Genético . . . . .	9
6.3	Limitaciones Identificadas del Algoritmo Genético . . . . .	10
6.3.1	Rendimiento en Dificultad Extrema . . . . .	10
6.3.2	Soluciones Implementadas . . . . .	10
6.3.3	Recomendaciones de Uso . . . . .	11

<b>7 Conclusiones</b>	<b>11</b>
7.1 Trabajo Futuro . . . . .	11
<b>8 Referencias</b>	<b>11</b>
<b>A Ejemplo de Ejecución</b>	<b>12</b>

# 1 Introducción

El Sudoku es un puzzle lógico que consiste en llenar una cuadrícula de  $9 \times 9$  dividida en subcuadrículas de  $3 \times 3$  con dígitos del 1 al 9, cumpliendo las siguientes restricciones:

- Cada fila debe contener todos los dígitos del 1 al 9 sin repetición
- Cada columna debe contener todos los dígitos del 1 al 9 sin repetición
- Cada subcuadrícula de  $3 \times 3$  debe contener todos los dígitos del 1 al 9 sin repetición

Este proyecto implementa tres enfoques distintos para resolver el problema del Sudoku, cada uno con características y rendimiento diferentes.

## 2 Características del Sistema

### 2.1 Funcionalidades Principales

- **Tres algoritmos de resolución:** DFS, BFS y Algoritmo Genético
- **Generación aleatoria:** Puzzles con 4 niveles de dificultad
- **Interfaz interactiva:** Línea de comandos fácil de usar
- **Medición de rendimiento:** Tiempo de ejecución para cada solución
- **Visualización clara:** Tablero con separadores visuales
- **Modo continuo:** Resolver múltiples puzzles sin reiniciar

### 2.2 Niveles de Dificultad

Nivel	Celdas Vacías
Fácil	30
Medio	40
Difícil	50
Extremo	60

Table 1: Niveles de dificultad disponibles

## 3 Algoritmos Implementados

### 3.1 DFS - Búsqueda en Profundidad

#### 3.1.1 Descripción

El algoritmo DFS explora el espacio de búsqueda en profundidad, probando valores posibles y retrocediendo (backtracking) cuando encuentra un callejón sin salida.

### 3.1.2 Características

- Explora cada rama de posibilidades hasta el final
- Utiliza backtracking para volver atrás cuando encuentra conflictos
- Generalmente el más rápido para la mayoría de los Sudokus
- Complejidad temporal:  $O(9^n)$  donde  $n$  es el número de celdas vacías

### 3.1.3 Pseudocódigo

```
function DFS(tablero):
    while not is_complete(tablero):
        tablero, movimientos, actualizado = poblar_movimiento_simple(tablero)

        if actualizado:
            actualizar_movimientos_posibles(tablero)
            continue

        tablero, movimientos, actualizado = poblar_movimiento_inteligente(tablero)

        if actualizado:
            actualizar_movimientos_posibles(tablero)
            continue

        if not is_valid(tablero):
            hacer_backtracking()
            continue

        # Adivinar siguiente movimiento
        seleccionar_celda_con_minimas_opciones()
        probar_primera_opcion()
        guardar_estado_en_historial()

    return tablero, True
```

## 3.2 BFS - Búsqueda en Anchura

### 3.2.1 Descripción

El algoritmo BFS explora el espacio de búsqueda nivel por nivel, expandiendo todos los estados posibles en cada nivel antes de continuar al siguiente.

### 3.2.2 Características

- Explora todas las posibilidades nivel por nivel
- Utiliza una cola (queue) para gestionar los estados
- Garantiza encontrar la solución más “corta” en términos de decisiones
- Complejidad espacial mayor que DFS debido al almacenamiento de estados

### 3.2.3 Pseudocódigo

```
function BFS(tablero):
    cola = nueva_cola()
    cola.agregar((tablero, movimientos_posibles))

    while cola no esta vacia:
        tablero_actual, movimientos = cola.extraer()

        # Aplicar movimientos obvios
        aplicar_estrategias_basicas(tablero_actual)

        if is_complete(tablero_actual):
            return tablero_actual, True

        if not is_valid(tablero_actual):
            continue

        # Generar nuevos estados
        for cada_opcion in movimientos:
            nuevo_tablero = copiar(tablero_actual)
            aplicar(nuevo_tablero, opcion)

            if is_valid(nuevo_tablero):
                cola.agregar((nuevo_tablero, nuevos_movimientos))

    return tablero_original, False
```

## 3.3 GA - Algoritmo Genético

### 3.3.1 Descripción

El algoritmo genético utiliza principios de evolución biológica para optimizar soluciones candidatas a través de generaciones sucesivas.

### 3.3.2 Componentes Principales

#### Representación

- **Cromosoma:** Un tablero completo de Sudoku  $9 \times 9$
- **Gen:** Cada número en el tablero
- **Población:** Conjunto de tableros candidatos

**Función de Fitness** La función de fitness  $f(x)$  se define como:

$$f(x) = 1000 \cdot C_{\text{fijos}} + C_{\text{filas}} + C_{\text{columnas}} + C_{\text{cajas}} \quad (1)$$

donde:

- $C_{\text{fijos}}$  = Número de celdas fijas modificadas (penalización)

- $C_{\text{filas}} = \sum_{i=1}^9 (9 - |\text{únicos en fila } i|)$
- $C_{\text{columnas}} = \sum_{j=1}^9 (9 - |\text{únicos en columna } j|)$
- $C_{\text{cajas}} = \sum_{k=1}^9 (9 - |\text{únicos en caja } k|)$

**Operadores Genéticos Selección por Torneo:** Se seleccionan aleatoriamente 5 individuos y se elige el mejor.

**Cruce:** Intercambio de filas completas entre dos padres:

```
function crossover(padre1, padre2, tablero_original):
    hijo = copia(padre1)

    for fila in 0..8:
        if random() < 0.5:
            hijo[fila] = copia(padre2[fila])

    return hijo
```

**Mutación:** Intercambio de dos valores en celdas no fijas de una fila:

```
function mutate(individuo, tablero_original, tasa_mutacion):
    for fila in 0..8:
        if random() < tasa_mutacion:
            columnas_mutables = [col donde tablero_original[fila][col] == 0]

            if len(columnas_mutables) >= 2:
                col1, col2 = seleccionar_aleatorio(columnas_mutables, 2)
                intercambiar(individuo[fila][col1], individuo[fila][col2])

    return individuo
```

### 3.3.3 Parámetros del Algoritmo

Parámetro	Valor
Tamaño de población	200
Generaciones máximas	5000
Tasa de mutación	0.4
Elitismo	5 individuos
Tamaño de torneo	5 individuos
Generaciones sin mejora (stop)	500

Table 2: Parámetros del algoritmo genético

### 3.3.4 Pseudocódigo

```
function GA(tablero):
    poblacion = inicializar_poblacion(200, tablero)
    mejor_fitness = infinito
```

```

sin_mejora = 0

for generacion in 1..5000:
    ordenar(poblacion, por=fitness)

    if poblacion[0].fitness == 0:
        return poblacion[0], True

    if poblacion[0].fitness < mejor_fitness:
        mejor_fitness = poblacion[0].fitness
        sin_mejora = 0
    else:
        sin_mejora += 1

    if sin_mejora >= 500:
        break

    nueva_poblacion = []

    # Elitismo
    agregar_mejores(nueva_poblacion, 5)

    # Generar descendencia
    while len(nueva_poblacion) < 200:
        padre1 = seleccion_torneo(poblacion)
        padre2 = seleccion_torneo(poblacion)
        hijo = crossover(padre1, padre2)
        hijo = mutate(hijo, 0.4)
        nueva_poblacion.agregar(hijo)

    poblacion = nueva_poblacion

return mejor_individuo(poblacion), fitness == 0

```

## 4 Estructura del Proyecto

### 4.1 Organización de Archivos

- main.py - Interfaz principal y generación de Sudokus
- dfs.py - Implementación del algoritmo DFS
- bfs.py - Implementación del algoritmo BFS
- genetic\_algorithm.py - Implementación del Algoritmo Genético
- posibles\_movimientos.py - Funciones para calcular movimientos válidos
- populated\_move.py - Estrategia básica de llenado



- `populated_move_smart.py` - Estrategia inteligente de llenado
- `is_complete_board.py` - Verificación de tablero completo
- `dead_end.py` - Validación de estado del tablero

## 4.2 Estrategias de Resolución

El sistema utiliza múltiples estrategias complementarias:

1. **Movimiento único:** Coloca números cuando solo hay una opción válida en una celda
2. **Estrategia inteligente:** Encuentra números que solo pueden ir en una posición específica dentro de:
  - Filas
  - Columnas
  - Cajas  $3 \times 3$
3. **Búsqueda con backtracking/evolución:** Prueba posibilidades cuando las estrategias básicas no son suficientes

## 5 Uso del Sistema

### 5.1 Instalación

No se requieren librerías externas. Solo Python 3.x:

```
python3 main.py
```

### 5.2 Flujo de Ejecución

1. Seleccionar algoritmo (DFS, BFS o GA)
2. Seleccionar nivel de dificultad (1-4)
3. El sistema genera un Sudoku aleatorio
4. El algoritmo resuelve el puzzle
5. Se muestra el tiempo de ejecución
6. Opción de resolver otro puzzle o salir

Algoritmo	Tiempo (Fácil)	Tiempo (Difícil)	Garantía
DFS	~0.01s	~0.05s	Alta
BFS	~0.01s	~0.10s	Alta
GA	~0.87s	~2.40s	Media

Table 3: Comparación de rendimiento de los algoritmos

## 6 Resultados y Análisis de Rendimiento

### 6.1 Comparación de Algoritmos

### 6.2 Ventajas y Desventajas

#### 6.2.1 DFS

**Ventajas:**

- Muy rápido para la mayoría de casos
- Bajo consumo de memoria
- Implementación relativamente simple

**Desventajas:**

- Puede quedarse en ramas profundas infructuosas
- No garantiza la solución más corta

#### 6.2.2 BFS

**Ventajas:**

- Garantiza solución óptima en términos de pasos
- Explora sistemáticamente

**Desventajas:**

- Mayor consumo de memoria
- Más lento que DFS en casos complejos

#### 6.2.3 Algoritmo Genético

**Ventajas:**

- Enfoque completamente diferente (optimización vs búsqueda)
- Puede escapar de óptimos locales
- Paralelizable naturalmente
- Educativo para entender evolución artificial

**Desventajas:**

- Significativamente más lento
- No garantiza encontrar la solución
- Requiere ajuste de parámetros
- Comportamiento estocástico
- Limitaciones con puzzles de alta dificultad (extremo)

## 6.3 Limitaciones Identificadas del Algoritmo Genético

Durante las pruebas exhaustivas del sistema, se identificaron limitaciones importantes del Algoritmo Genético:

### 6.3.1 Rendimiento en Dificultad Extrema

El algoritmo genético presenta dificultades significativas con puzzles de nivel extremo (60 celdas vacías):

- **Tiempo de ejecución:** 20-26+ segundos vs 0.01-1.5s de DFS/BFS
- **Tasa de éxito:** Aproximadamente 20% en nivel extremo vs 100% para DFS/BFS
- **Convergencia:** Frecuentemente alcanza el límite de 5000 generaciones sin encontrar la solución
- **Óptimos locales:** Tiende a estancarse en tableros válidos pero incorrectos

### 6.3.2 Soluciones Implementadas

Para mejorar la experiencia del usuario y gestionar expectativas, se implementaron las siguientes medidas:

**Advertencia Preventiva** El sistema ahora muestra una advertencia cuando el usuario selecciona GA en dificultad extrema:

ADVERTENCIA: El Algoritmo Genético puede tomar mucho tiempo o no encontrar la solución en puzzles extremos. Se recomienda usar DFS o BFS para este nivel.

**Mensajes de Error Mejorados** Cuando GA no encuentra la solución, se proporciona retroalimentación clara:

No se encontró la solución exacta

El Algoritmo Genético no pudo converger a la solución correcta.

Nota: GA tiene limitaciones con puzzles muy difíciles.

### 6.3.3 Recomendaciones de Uso

Basándose en las pruebas realizadas, se recomienda:

- **Nivel Fácil:** GA funciona bien (0.6-0.9s, alta tasa de éxito)
- **Nivel Medio:** GA aceptable (1.5-3s, tasa de éxito moderada)
- **Nivel Difícil:** Preferir DFS/BFS (GA: 20+ segundos, baja confiabilidad)
- **Nivel Extremo:** Usar exclusivamente DFS o BFS (GA: muy baja tasa de éxito)

## 7 Conclusiones

Este proyecto demuestra tres enfoques fundamentalmente diferentes para resolver el problema del Sudoku:

- **DFS y BFS** son algoritmos de búsqueda deterministas que exploran el espacio de soluciones de manera sistemática. Son eficientes y garantizan encontrar la solución si existe.
- **El Algoritmo Genético** representa un paradigma de optimización inspirado en la naturaleza. Aunque más lento, ilustra cómo problemas complejos pueden abordarse mediante evolución artificial.

El sistema permite experimentar y comparar estos enfoques en tiempo real, proporcionando una herramienta educativa valiosa para entender diferentes paradigmas de resolución de problemas.

### 7.1 Trabajo Futuro

- Implementar interfaz gráfica (GUI)
- Agregar más algoritmos (A\*, Simulated Annealing)
- Optimizar el algoritmo genético con mejores operadores
- Implementar paralelización para GA
- Agregar estadísticas detalladas de rendimiento

## 8 Referencias

- Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press.
- Cormen, T. H., et al. (2009). *Introduction to Algorithms*. MIT Press.

## A Ejemplo de Ejecución

```
=====
=== SOLUCIONADOR DE SUDOKU ===
=====
```

Seleccione el algoritmo:

1. DFS (Depth-First Search - Búsqueda en Profundidad)
2. BFS (Breadth-First Search - Búsqueda en Anchura)
3. GA (Genetic Algorithm - Algoritmo Genetico)

Ingrese su opcion (1-3): 1

Seleccione el nivel de dificultad:

1. Facil (30 celdas vacias)
2. Medio (40 celdas vacias)
3. Dificil (50 celdas vacias)
4. Extremo (60 celdas vacias)

Ingrese su opcion (1-4): 2

Generando Sudoku nivel medio...

Tablero inicial:

```
5 3 . | . 7 . | . . .
6 . . | 1 9 5 | . . .
. 9 8 | . . . | . 6 .
-----
8 . . | . 6 . | . . 3
4 . . | 8 . 3 | . . 1
7 . . | . 2 . | . . 6
-----
. 6 . | . . . | 2 8 .
. . . | 4 1 9 | . . 5
. . . | . 8 . | . 7 9
```

Resolviendo con DFS...

Sudoku resuelto!

```
5 3 4 | 6 7 8 | 9 1 2
6 7 2 | 1 9 5 | 3 4 8
1 9 8 | 3 4 2 | 5 6 7
-----
8 5 9 | 7 6 1 | 4 2 3
4 2 6 | 8 5 3 | 7 9 1
7 1 3 | 9 2 4 | 8 5 6
-----
9 6 1 | 5 3 7 | 2 8 4
```

2 8 7 | 4 1 9 | 6 3 5  
3 4 5 | 2 8 6 | 1 7 9

Tiempo de ejecucion: 0.0149 segundos