

DSViz Listas enlazadas: diseño

Arquitectura y decisiones de diseño

**Gustavo Gutiérrez-Sabogal
Jovanny Bedoya-Guapacha
Nancy Janet Castillo-Rodríguez**

Índice

1	Introducción	7
1.1	Motivación	7
1.2	Tecnologías principales	7
1.3	Alcance	8
1.4	Audiencia	8
1.5	Estructura del documento	8
2	Arquitectura General	9
2.1	Tecnologías principales	9
2.1.1	Framework y construcción	9
2.1.2	Visualización	9
2.1.3	Interfaz de usuario	9
2.2	Estructura del proyecto	9
2.2.1	Organización modular	11
2.3	Flujo de datos	11
2.3.1	Animaciones	11
3	Modelo de Datos	13
3.1	Representación de nodos	13
3.1.1	Nodo de lista (<code>LinkedListNode</code>)	13
3.1.2	Nodo circular (<code>CircleNode</code>)	13
3.2	Representación de aristas	13
3.2.1	Aristas de lista	13
3.2.2	Aristas de puntero	14
3.3	Gestión de estado	14
3.3.1	Variables de estado	14
3.3.2	Patrón <code>OperationContext</code>	14
3.4	Constantes de configuración	15
3.4.1	Disposición (<code>LAYOUT</code>)	15
3.4.2	Colores (<code>COLORS</code>)	15
3.4.3	Animación (<code>ANIMATION</code>)	15
3.4.4	Operaciones (<code>OPERATIONS</code>)	16
4	Motor de Visualización	17
4.1	Integración con <code>xyflow</code> (<code>React Flow</code>)	17
4.1.1	Registro de tipos de nodos	17
4.1.2	Sistema de <i>handles</i>	17
4.1.3	Validación de conexiones	17
4.1.4	Interacción con el lienzo	17
4.2	Sistema de animaciones	17
4.2.1	Patrón de animación	18
4.2.2	Ejemplo: inserción en la cabeza	18
4.2.3	Ejemplo: recorrido de la lista	18

4.2.4	Ejemplo: inversión de la lista	18
4.2.5	Patrones comunes en las operaciones	18
4.3	Disposición automática con ELK	19
4.3.1	Algoritmo utilizado	19
4.3.2	Posicionamiento de punteros	19
4.3.3	Activación	19
4.4	Hook de visualización	19
5	Interfaz de Usuario	21
5.1	Componentes principales	21
5.1.1	Componente orquestador (<code>page.tsx</code>)	21
5.1.2	Nodo de lista (<code>LinkedListNode</code>)	21
5.1.3	Nodo circular (<code>CircleNode</code>)	22
5.2	Sistema de menús	22
5.2.1	Estructura del menú	22
5.2.2	Componente <code>Section</code>	23
5.2.3	Componente <code>MenuHeader</code>	23
5.2.4	Sección de operaciones	23
5.3	Estilización con Tailwind CSS y Radix UI	23
5.3.1	Tailwind CSS	23
5.3.2	Sistema de colores	23
5.3.3	Componentes shadcn/ui	24
5.3.4	Diseño adaptativo	24
6	Despliegue y CI/CD	25
6.1	Requisitos de infraestructura	25
6.2	GitHub Pages	25
6.2.1	Configuración de Next.js	25
6.2.2	Enrutamiento del lado del cliente	25
6.3	Flujo de trabajo con GitHub Actions	25
6.3.1	Etapas del flujo	25
6.3.2	Control de concurrencia	26
6.4	Proceso de construcción	26
6.4.1	Construcción de la aplicación	26
6.4.2	Construcción de la documentación	26
6.4.3	Flujo completo de despliegue	26
6.5	Estructura de URLs desplegadas	27
7	Pruebas de validación y evaluación de impacto pedagógico	29
7.1	Metodología de Validación	29
7.2	Resultados	30
7.2.1	Caracterización de la muestra	30
7.2.2	Usabilidad	31
7.2.3	Impacto en el aprendizaje	31
7.2.4	Comparación con el aprendizaje basado en código	32
7.2.5	Métodos de aprendizaje preferidos	32
7.2.6	Motivación	32
7.2.7	Calificación general	33
7.2.8	Retroalimentación cualitativa	33
7.3	Conclusiones de la validación	34



1. Introducción

Este documento describe las decisiones de diseño y la arquitectura del visualizador de listas enlazadas **DSViz: Listas enlazadas**. Su objetivo es servir como referencia técnica para desarrolladores y colaboradores del proyecto.

1.1 Motivación

DSViz: Listas enlazadas nació como una ayuda didáctica para el curso de *Estructuras de datos* del programa de Ingeniería de Sistemas y Computación de la **Universidad Tecnológica de Pereira (UTP)**. Su propósito central es facilitar tanto el aprendizaje como la enseñanza del concepto de *lista enlazada simple*: una estructura de datos cuyo comportamiento —nodos, apuntadores y operaciones— resulta difícil de abstraer únicamente a través de la lectura de código o de diagramas estáticos.

La herramienta permite a los estudiantes observar en tiempo real cómo se modifica la estructura interna de la lista al ejecutar cada operación, y a los docentes disponer de un recurso visual e interactivo que complementa la explicación en clase. Al ejecutarse íntegramente en el navegador sin requerir instalación ni infraestructura adicional, puede incorporarse con facilidad tanto en sesiones presenciales como en actividades de estudio independiente.

Las decisiones de diseño están guiadas por los siguientes principios:

- **Cero instalación:** la aplicación se ejecuta completamente en el navegador como una *Single Page Application* (SPA) desplegada en GitHub Pages.
- **Interactividad:** los estudiantes tienen acceso a la estructura interna con los nodos y apuntadores de la estructura de datos.
- **Visualización paso a paso de operaciones:** cada operación sobre la estructura de datos se anima de manera secuencial para facilitar la comprensión del algoritmo subyacente.
- **Separación conceptual:** los elementos de programación (punteros, direcciones de memoria) se mantienen separados de la representación conceptual de la estructura.

1.2 Tecnologías principales

La aplicación está construida sobre el siguiente conjunto de tecnologías:

Categoría	Tecnología	Versión
Framework	Next.js (App Router)	16
Lenguaje	TypeScript (modo estricto)	5.9
Biblioteca UI	React	19
Visualización	React Flow (@xyflow)	12
Disposición	ELK.js (Sugiyama)	0.11
Estilos	Tailwind CSS	3.4
Componentes	shadcn/ui (Radix UI)	—
Tour guiado	driver.js	1.4
Exportación	html-to-image	1.11

TypeScript fue elegido como lenguaje de desarrollo por las ventajas que su sistema de tipos estáticos aporta a un proyecto de esta naturaleza. Al modelar estructuras como nodos, aristas y el estado de animaciones, la verificación de tipos en tiempo de compilación detecta errores antes de la ejecución y sirve como documentación viva del código. El proyecto habilita el modo estricto ("strict": true), que activa las

comprobaciones más rigurosas del compilador, incluyendo la comprobación de nulos y la prohibición del tipo implícito `any`. Adicionalmente, TypeScript ofrece integración de primera clase con los entornos de desarrollo más utilizados, proporcionando autocompletado, documentación en línea y refactorizaciones seguras sin alterar la compatibilidad con el ecosistema JavaScript estándar.

1.3 Alcance

El presente documento cubre la versión actual del módulo. Se describen las tecnologías utilizadas, la estructura del proyecto, el modelo de datos, el motor de visualización, la interfaz de usuario, el proceso de despliegue y los resultados de la validación pedagógica realizada con estudiantes de la UTP.

1.4 Audiencia

Este documento está dirigido a desarrolladores que deseen contribuir al proyecto, así como a docentes y estudiantes interesados en comprender la implementación interna del simulador.

1.5 Estructura del documento

El documento se organiza en los siguientes capítulos:

1. **Arquitectura General** (Capítulo 2.): describe las tecnologías, la estructura del proyecto y el flujo de datos.
2. **Modelo de Datos** (Capítulo 3.): detalla las interfaces de tipos, las fábricas de nodos y aristas, y la gestión de estado.
3. **Motor de Visualización** (Capítulo 4.): explica la integración con xyflow, el sistema de animaciones y la disposición automática con ELK.
4. **Interfaz de Usuario** (Capítulo 5.): presenta los componentes principales, el sistema de menús y la estilización.
5. **Despliegue y CI/CD** (Capítulo 6.): documenta el proceso de construcción, despliegue en GitHub Pages y el flujo de trabajo con GitHub Actions.
6. **Pruebas de validación** (Capítulo 7.): describe la metodología de evaluación con estudiantes y los resultados de la prueba de campo realizada en la UTP.

2. Arquitectura General

2.1 Tecnologías principales

2.1.1 Framework y construcción

La aplicación utiliza **Next.js 16** con el *App Router* como framework principal. Next.js fue seleccionado por las siguientes razones:

- Soporte nativo para TypeScript y compilación incremental.
- Sistema de rutas basado en el sistema de archivos (`src/app/`).
- Exportación estática (`output: 'export'`) que permite desplegar en GitHub Pages sin necesidad de un servidor.

El proyecto se compila con **TypeScript 5.9** en modo estricto (`strict: true`), lo que garantiza seguridad de tipos en todo el código fuente. La configuración de TypeScript utiliza alias de rutas (`@/* apunta a ./src/*`) para simplificar las importaciones.

2.1.2 Visualización

El motor de visualización se basa en dos bibliotecas complementarias:

- **@xyflow/react** (React Flow v12): biblioteca para la visualización interactiva de grafos basados en nodos y aristas. Proporciona el lienzo (*canvas*), el sistema de nodos arrastrables, las conexiones entre nodos y los controles de navegación.
- **ELK.js** (v0.11): biblioteca de disposición automática de grafos que implementa el algoritmo de Sugiyama (*layered layout*). Se utiliza para organizar automáticamente los nodos de la lista en disposición horizontal.

2.1.3 Interfaz de usuario

La interfaz se construye con las siguientes tecnologías:

- **Tailwind CSS** (v3.4): framework CSS *utility-first* para la estilización.
- **shadcn/ui**: colección de componentes reutilizables construidos sobre primitivas de **Radix UI**. Incluye botones, entradas de texto, *sliders*, *switches* y selectores.
- **Lucide React**: biblioteca de iconos SVG.
- **driver.js**: biblioteca para tours guiados interactivos con soporte para localización en español.

2.2 Estructura del proyecto

El código fuente se organiza bajo el directorio `src/` siguiendo la convención del *App Router* de Next.js:

```
src/
  └── app/
    ├── layout.tsx          # Layout raíz (fuentes, estilos globales)
    ├── page.tsx            # Página principal (redirección a /sll)
    ├── globals.css          # Estilos CSS globales y Tailwind
    ├── about/page.tsx      # Página "Acerca de"
    └── sll/
      ├── page.tsx          # Componente principal (orquestrador)
      ├── LinkedListNode.tsx # Componente de nodo de lista
      ├── CircleNode.tsx     # Componente de nodo circular (punteros)
      ├── constants.ts       # Constantes de configuración
      └── hooks/
        ├── useListOperations.ts
        └── useListVisualization.ts
```

```

    └── useListInitialization.ts
  operations/          # 16 operaciones individuales
  ├── index.ts
  ├── insertAtHead.ts
  ├── insertAtTail.ts
  ├── insertAtTail01.ts
  ├── insertAtPosition.ts
  ├── deleteAtHead.ts
  ├── deleteAtTail.ts
  ├── deleteAtPosition.ts
  ├── traverseList.ts
  ├── reverseList.ts
  ├── searchValue.ts
  ├── getLength.ts
  ├── findMiddle.ts
  ├── accessFront.ts
  ├── accessBack.ts
  ├── accessNth.ts
  └── removeDuplicates.ts
  utils/              # Utilidades
  ├── nodeFactory.ts
  ├── edgeFactory.ts
  ├── nodeFilters.ts
  ├── pointerHelpers.ts
  ├── listHelpers.ts
  ├── elkLayout.ts
  └── helpers.ts
components/          # Componentes compartidos
  menu/
  ├── Menu.tsx          # Panel lateral de controles
  ├── MenuHeader.tsx    # Encabezado animado del menú
  ├── Section.tsx       # Sección colapsable reutilizable
  ├── ColorPickerInput.tsx # Selector de color
  └── sections/
    ├── ListCreation.tsx # Creación de listas
    ├── Operations.tsx   # Operaciones sobre la lista
    ├── DisplayOptions.tsx # Opciones de visualización
    └── TestSection.tsx   # Sección experimental
  navbar.tsx           # Barra de navegación
  footer.tsx           # Pie de página
  hero.tsx             # Sección hero de la landing
  ui/
  ├── button.tsx
  ├── input.tsx
  ├── slider.tsx
  ├── select.tsx
  ├── switch.tsx
  └── card.tsx
  ├── custom-slider.tsx      # Slider con etiqueta
  ├── custom-select.tsx      # Selector personalizado
  ├── custom-toggle.tsx      # Toggle con etiqueta
  ├── custom-input.tsx       # Input personalizado
  └── algorithm-cards.tsx    # Tarjetas de algoritmos
types/
  ├── linked-list.ts       # Tipos del modelo de datos
  ├── common.ts             # Tipos compartidos (DOM, selección)
  ├── hooks.ts              # Tipos de hooks
  ├── utils.ts               # Tipos de utilidades
  └── index.ts              # Exportaciones centralizadas
lib/
  ├── utils.ts             # Función cn() para clases CSS

```

```

└── helpers/
    └── array_helpers.ts      # Utilidades de arrays

```

2.2.1 Organización modular

La estructura del módulo de visualización está organizada de manera modular con una estructura consistente:

- **page.tsx**: componente principal que actúa como orquestador del estado y la visualización.
- **hooks/**: *custom hooks* que encapsulan la lógica del visualizador. Estos permiten separar la lógica de la visualización de los componentes.
- **operations/**: funciones pures que implementan cada operación sobre la estructura de datos.
- **utils/**: fábricas y funciones auxiliares.

Esta separación permite agregar nuevas operaciones y algoritmos siguiendo el mismo patrón.

2.3 Flujo de datos

El flujo de datos de la aplicación sigue un patrón unidireccional que puede describirse en las siguientes etapas:

1. **Acción del usuario**: el usuario interactúa con el menú lateral (por ejemplo, hace clic en «At Head» para insertar un elemento).
2. **Manejador de evento**: el componente `Menu` invoca el callback `onVisualize(opIndex, value, position)` que está definido en `page.tsx`.
3. **Despacho de operación**: la función `handleVisualize` en `page.tsx` determina la operación correspondiente mediante un `switch` y la delega al hook `useListOperations`.
4. **Ejecución de la operación**: el hook construye un `OperationContext` con el estado actual y lo pasa a la función de operación correspondiente (por ejemplo, `insertAtHead`).
5. **Actualización de estado**: la operación modifica los nodos y aristas llamando a `setState()`, que actualiza el estado de React en `page.tsx`.
6. **Procesamiento visual**: el hook `useListVisualization` filtra y transforma los nodos y aristas según las opciones de visualización activas (punteros visibles, resultado de cabeza/cola, nodo bajo el cursor).
7. **Renderizado**: React Flow recibe los nodos y aristas procesados (`highlightedNodes`, `highlightedEdges`) y los renderiza en el lienzo.

El siguiente diagrama de secuencia ilustra este flujo de datos desde la acción del usuario hasta el renderizado de la visualización:

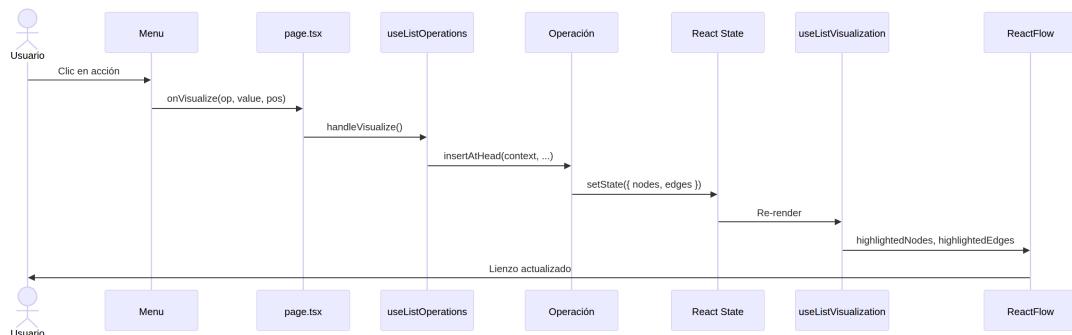


Figura 2.1: Flujo de datos desde la acción del usuario hasta el renderizado.

2.3.1 Animaciones

Las animaciones se logran mediante un patrón asíncrono: cada operación es una función `async` que alterna entre llamadas a `setState()` (para actualizar la visualización) y `await sleep(speed)` (para pausar entre fotogramas). Esto permite que el usuario observe el progreso paso a paso de cada algoritmo. La velocidad de animación es configurable a través del `slider` de velocidad en el menú de opciones de visualización.

3. Modelo de Datos

Este capítulo describe las estructuras de datos internas utilizadas para representar la lista enlazada en el motor de visualización. Todas las definiciones de tipos se encuentran en el directorio `src/types/`.

3.1 Representación de nodos

La visualización utiliza dos tipos de nodos, ambos basados en la interfaz `Node` de xyflow:

3.1.1 Nodo de lista (`LinkedListNode`)

Representa un elemento de la lista enlazada. Su interfaz de datos es:

```
interface ListNodeData {  
    label: string; // Valor del nodo  
    nodeId: string; // Identificador único  
    onPointerHover: (nodeId: string | null) => void; // Callback de hover  
}
```

Cada nodo de lista tiene cuatro *handles* (puntos de conexión):

- **Right (source)**: punto de salida para la arista al siguiente nodo.
- **Left (target)**: punto de entrada desde el nodo anterior.
- **Top (target)**: punto de conexión para punteros desde arriba (e.g. `head`).
- **Bottom (target)**: punto de conexión para punteros desde abajo (e.g. `tail`).

La creación de nodos se realiza mediante la función fábrica `createListNode` definida en `src/app/sll/utils/nodeFactory.ts`, que recibe un identificador, valor, posición y color de fondo.

3.1.2 Nodo circular (`CircleNode`)

Representa un puntero o referencia. Se utiliza para visualizar los punteros `head`, `tail` y los punteros adicionales creados por el usuario.

```
interface CircleNodeData {  
    label: string; // Etiqueta (H, T, C)  
    nodeId: string; // Identificador único  
    onPointerHover: (nodeId: string | null) => void; // Callback de hover  
    onLabelChange: (nodeId: string, newLabel: string) => void; // Edición  
}
```

Los nodos circulares permiten edición de la etiqueta mediante doble clic (máximo 3 caracteres). Se crean con `createCircleNode` de `nodeFactory.ts`.

3.2 Representación de aristas

Las aristas representan las conexiones entre nodos (representando el concepto de puntero). La aplicación utiliza tres tipos de aristas, todas creadas por funciones fábrica en `src/app/sll/utils/edgeFactory.ts`:

3.2.1 Aristas de lista

Conectan nodos consecutivos de la lista (del *handle* derecho de un nodo al *handle* izquierdo del siguiente). Utilizan el tipo `smoothstep` con una flecha `ArrowClosed` como marcador.

```
function createListEdge(  
    sourceId: string,  
    targetId: string  
) : Edge
```

3.2.2 Aristas de puntero

Conectan los nodos circulares (*head*, *tail*) con los nodos de la lista:

- `createHeadPointerEdge`: conecta el puntero *head* al *handle* superior del primer nodo de la lista.
- `createTailPointerEdge`: conecta el puntero *tail* al *handle* inferior del último nodo de la lista.

Estas aristas se reconstruyen automáticamente después de cada operación estructural mediante la función `createPointerEdges` de `src/app/sll/utils/pointerHelpers.ts`.

3.3 Gestión de estado

El estado de la aplicación se gestiona enteramente en el componente principal `page.tsx` mediante *hooks* de estado de React. No se utiliza un gestor de estado externo (como Redux o Zustand), ya que el alcance del estado es local al módulo de visualización.

3.3.1 Variables de estado

El componente principal mantiene las siguientes variables de estado:

Variable	Tipo	Descripción
<code>nodes</code>	<code>Node[]</code>	Todos los nodos (lista + punteros)
<code>edges</code>	<code>Edge[]</code>	Todas las aristas
<code>count</code>	<code>number</code>	Cantidad de nodos para creación aleatoria
<code>speed</code>	<code>number</code>	Velocidad de animación (ms entre fotogramas)
<code>isRunning</code>	<code>boolean</code>	Indica si una operación está en ejecución
<code>operation</code>	<code>number</code>	Índice de la operación seleccionada
<code>hoveredNodeId</code>	<code>string \ null</code>	ID del nodo bajo el cursor
<code>highlightHead</code>	<code>boolean</code>	Resaltar nodo cabeza
<code>highlightTail</code>	<code>boolean</code>	Resaltar nodo cola
<code>nodeColor</code>	<code>string</code>	Color base de los nodos
<code>newNodeColor</code>	<code>string</code>	Color de nodos recién insertados
<code>iterateColor</code>	<code>string</code>	Color del nodo activo durante animación
<code>showPointers</code>	<code>boolean</code>	Mostrar/ocultar punteros head y tail
<code>autoAdjust</code>	<code>boolean</code>	Ajustar lienzo automáticamente
<code>selectedNodes</code>	<code>string[]</code>	IDs de nodos seleccionados
<code>laserPointerEnabled</code>	<code>boolean</code>	Activar puntero láser
<code>laserPointerPosition{ x, y }</code>		Posición actual del puntero láser
<code>isReconnecting</code>	<code>boolean</code>	Indica si se está reconectando una arista
<code>lengthResult</code>	<code>number \ null</code>	Resultado de la operación <i>Get Length</i>
<code>searchResult</code>	<code>object \ null</code>	Resultado de la operación <i>Search</i>

3.3.2 Patrón OperationContext

Para evitar pasar múltiples parámetros a cada operación, se utiliza un objeto de contexto que encapsula todo lo necesario:

```
interface OperationContext {
  state: OperationState;
```

```

    setState: (updates: NodeEdgeUpdate | StateUpdater,
               callback?: () => void) => void;
  reactFlowInstance?: ReactFlowInstance;
  handlePointerHover: (nodeId: string | null) => void;
}

interface OperationState {
  nodes: Node[];
  edges: Edge[];
  speed: number;
  iterateColor: string;
  newNodeColor?: string;
}

```

Este patrón permite que las operaciones sean funciones puras que reciben un contexto y lo modifican, sin depender de variables externas. El hook `useListOperations` se encarga de construir el contexto a partir del estado actual de React.

3.4 Constantes de configuración

Todas las constantes de configuración están centralizadas en el archivo `src/app/sll/constants.ts`. Las principales categorías son:

3.4.1 Disposición (LAYOUT)

Constante	Valor	Descripción
<code>NODE_HORIZONTAL_SPACING</code>	150px	Separación horizontal entre nodos
<code>POINTER_VERTICAL_OFFSET</code>	100px	Distancia vertical de los punteros
<code>INITIAL_X</code>	50px	Posición X inicial
<code>INITIAL_Y</code>	100px	Posición Y inicial
<code>FIT_VIEW_PADDING</code>	0.3	Padding del ajuste de vista

3.4.2 Colores (COLORS)

Constante	Valor	Uso
<code>NODE_DEFAULT</code>	#2196F3	Color base de los nodos (azul)
<code>NODE_NEW</code>	#4CAF50	Nodos recién insertados (verde)
<code>NODE_ITERATE</code>	#FF5722	Nodo activo en animación (naranja)
<code>HEAD_HIGHLIGHT</code>	#9C27B0	Resaltado de cabeza (púrpura)
<code>TAIL_HIGHLIGHT</code>	#E91E63	Resaltado de cola (rosa)
<code>EDGE_DEFAULT</code>	#333	Color de las aristas

3.4.3 Animación (ANIMATION)

Constante	Valor	Descripción
<code>DEFAULT_SPEED</code>	500ms	Velocidad predeterminada
<code>FIT_VIEW_DURATION</code>	500ms	Duración de la transición del lienzo
<code>FIT_VIEW_DELAY</code>	100ms	Retardo antes del ajuste de vista

3.4.4 Operaciones (OPERATIONS)

Las 16 operaciones disponibles están indexadas numéricamente:

Índice	Nombre	Categoría
0	<code>INSERT_HEAD</code>	Inserción
1	<code>DELETE_HEAD</code>	Borrado
2	<code>INSERT_TAIL</code>	Inserción
3	<code>DELETE_TAIL</code>	Borrado
4	<code>TRAVERSE</code>	Algoritmo
5	<code>REVERSE</code>	Algoritmo
6	<code>INSERT_TAIL_01</code>	Inserción
7	<code>INSERT_AT_POSITION</code>	Inserción
8	<code>GET_LENGTH</code>	Algoritmo
9	<code>SEARCH_VALUE</code>	Búsqueda
10	<code>FIND_MIDDLE</code>	Algoritmo
11	<code>DELETE_AT_POSITION</code>	Borrado
12	<code>REMOVE_DUPLICATES</code>	Algoritmo
13	<code>ACCESS_FRONT</code>	Acceso
14	<code>ACCESS_BACK</code>	Acceso
15	<code>ACCESS_NTH</code>	Acceso

4. Motor de Visualización

Este capítulo describe cómo la aplicación transforma el modelo de datos (descrito en Capítulo 3.) en una representación visual interactiva.

4.1 Integración con xyflow (React Flow)

La visualización se basa en la biblioteca [@xyflow/react](#) (React Flow v12), que proporciona un lienzo interactivo para grafos de nodos y aristas.

4.1.1 Registro de tipos de nodos

La aplicación registra dos tipos de nodos personalizados:

```
const nodeTypes = {
  linkedListNode: LinkedListNode,
  circleNode: CircleNode,
};
```

Estos componentes se definen en `src/app/sll/LinkedListNode.tsx` y `src/app/sll/CircleNode.tsx` respectivamente. Cada uno implementa su propia lógica de renderizado y manejo de eventos.

4.1.2 Sistema de *handles*

Los *handles* son los puntos de conexión que permiten trazar aristas entre nodos. El componente `LinkedListNode` define cuatro *handles*:

- **Right** (`Position.Right`, tipo `source`): representa el puntero `next` del nodo. Es el punto de salida para la arista hacia el siguiente elemento.
- **Left** (`Position.Left`, tipo `target`): punto de entrada desde el nodo anterior.
- **Top** (`Position.Top`, tipo `target`): utilizado por el puntero `head` para conectarse desde arriba.
- **Bottom** (`Position.Bottom`, tipo `target`): utilizado por el puntero `tail` para conectarse desde abajo.

4.1.3 Validación de conexiones

La función `isValidConnection` en `page.tsx` controla qué conexiones son válidas:

- Los nodos circulares solo pueden conectarse a los *handles* `top` o `bottom` de un nodo de lista.
- Se previene la conexión múltiple: si un nodo circular ya tiene una arista saliente, no se permite una segunda (excepto durante reconexión).

4.1.4 Interacción con el lienzo

ReactFlow se configura con las siguientes opciones de interacción:

- **Nodos arrastrables**: el usuario puede reposicionar cualquier nodo.
- **Selección parcial**: permite seleccionar nodos arrastrando un rectángulo.
- **Desplazamiento con scroll**: el lienzo se desplaza con la rueda del ratón.
- **Reconexión de aristas**: las aristas existentes pueden ser redirigidas a otros nodos.

4.2 Sistema de animaciones

Las animaciones son el componente central de la experiencia pedagógica. Cada operación sobre la lista se visualiza paso a paso para que el estudiante pueda seguir la ejecución del algoritmo.

4.2.1 Patrón de animación

Todas las operaciones siguen el mismo patrón asíncrono:

```
async function operacion(context: OperationContext, ...params) {
  const { state, setState } = context;
  const listNodes = getListNodes(state.nodes);

  // Paso 1: modificar nodos/aristas
  const updatedNodes = listNodes.map(node => /* ... */);
  setState({ nodes: updatedNodes });
  await sleep(state.speed);

  // Paso 2: siguiente modificación
  // ...

  // Paso final: restaurar colores
  setState({ nodes: resetColors(updatedNodes) });
}
```

La función `sleep` (definida en `src/app/sll/utils/helpers.ts`) es una promesa que se resuelve después de un número configurable de milisegundos, creando la pausa visual entre fotogramas.

4.2.2 Ejemplo: inserción en la cabeza

La operación `insertAtHead` (`src/app/sll/operations/insertAtHead.ts`) ilustra el patrón completo:

1. Filtra los nodos de lista mediante `getListNodes()`.
2. Calcula la posición X del nuevo nodo: `primerNodo.x - 150`.
3. Crea el nuevo nodo con el color `newNodeColor` usando `createListNode()`.
4. Inserta el nodo al inicio del arreglo de nodos.
5. Reconstruye todas las aristas con `createEdgesForList()`.
6. Actualiza las posiciones y aristas de los punteros `head` y `tail`.
7. Llama a `setState()` para actualizar la visualización.
8. Ejecuta `sleep(speed)` para la pausa animada.

4.2.3 Ejemplo: recorrido de la lista

La operación `traverseList` (`src/app/sll/operations/traverseList.ts`) muestra la animación iterativa:

1. Restablece todos los nodos al color predeterminado.
2. Itera sobre cada nodo de la lista:
 - Resalta los nodos visitados (del primero al actual) con `iterateColor`.
 - Llama a `setState()` con los nodos actualizados.
 - Espera `sleep(speed)` milisegundos.
3. Al finalizar, restablece todos los colores al valor predeterminado.

4.2.4 Ejemplo: inversión de la lista

La operación `reverseList` (`src/app/sll/operations/reverseList.ts`) es más compleja y consta de tres fases:

1. **Inversión de punteros:** para cada nodo, se elimina la arista saliente y se crea una nueva apuntando al nodo anterior. Se resaltan los nodos involucrados.
2. **Reposiciónamiento:** se invierte el orden del arreglo de nodos y se recalculan las posiciones X.
3. **Reconstrucción de aristas:** se crean las aristas finales y se actualizan los punteros `head` y `tail`.

4.2.5 Patrones comunes en las operaciones

Todas las operaciones comparten estos patrones:

- **Filtrado de nodos:** `getListNodes()` para separar nodos de lista de punteros circulares.
- **Reconstrucción de aristas:** `createEdgesForList()` después de cambios estructurales.

- **Actualización de punteros:** `updatePointers()` y `createPointerEdges()` para mantener los punteros sincronizados.
- **Animación por color:** uso de `.map()` sobre el arreglo de nodos para aplicar colores de resaltado según el índice de iteración.

4.3 Disposición automática con ELK

La disposición automática de los nodos se implementa mediante la biblioteca **ELK.js**, que proporciona algoritmos de disposición de grafos.

4.3.1 Algoritmo utilizado

Se utiliza el algoritmo **layered** (Sugiyama), configurado con dirección **RIGHT** para una disposición horizontal de izquierda a derecha. Este algoritmo es especialmente adecuado para estructuras lineales como las listas enlazadas.

La configuración se encuentra en `src/app/sll/utils/elkLayout.ts`:

```
const elk = new ELK();

const graph = {
  id: 'root',
  layoutOptions: {
    'elk.algorithm': 'layered',
    'elk.direction': 'RIGHT',
    'elk.spacing.nodeNode': '150',
  },
  children: nodes.map(node => ({
    id: node.id,
    width: nodeWidth,
    height: nodeHeight,
  })),
  edges: edges.map(edge => ({
    id: edge.id,
    sources: [edge.source],
    targets: [edge.target],
  })),
};


```

4.3.2 Posicionamiento de punteros

Después de calcular las posiciones de los nodos de lista, los nodos punteros (*head* y *tail*) se posicionan relativamente:

- **Head:** se ubica 100px por encima del primer nodo de la lista.
- **Tail:** se ubica 100px por debajo del último nodo de la lista.

Este cálculo se realiza mediante las funciones `getHeadPointerPosition` y `getTailPointerPosition` de `src/app/sll/utils/pointerHelpers.ts`.

4.3.3 Activación

La disposición automática se activa de dos maneras:

- **Botón *Auto Layout*:** en el menú *Display Options*, el usuario puede ejecutar manualmente la disposición.
- **Después de operaciones:** si la opción `autoAdjust` está habilitada, el lienzo se ajusta automáticamente después de cada operación mediante `reactFlowInstance.fitView()`.

4.4 Hook de visualización

El hook `useListVisualization` (`src/app/sll/hooks/useListVisualization.ts`) actúa como capa intermedia entre el estado bruto y lo que se renderiza en ReactFlow. Sus responsabilidades son:

1. **Filtrar punteros:** cuando `showPointers` es `false`, se eliminan los nodos circulares y sus aristas del conjunto renderizado.
2. **Resaltar cabeza y cola:** cuando las opciones `highlightHead` o `highlightTail` están activas, se modifican los estilos de los nodos correspondientes.
3. **Resaltar aristas al pasar el cursor:** cuando el usuario posiciona el cursor sobre la sección de puntero de un nodo, la arista saliente se resalta con el color de iteración.

El `hook` utiliza `useMemo` para evitar recálculos innecesarios y retorna los arreglos `highlightedNodes` y `highlightedEdges` que se pasan directamente a ReactFlow.

5. Interfaz de Usuario

Este capítulo describe el diseño de los componentes de la interfaz de usuario, el sistema de menús y la estrategia de estilización.

5.1 Componentes principales

La interfaz se divide en tres áreas principales, como se muestra en la Figura 5.1:

1. **Barra de navegación** (parte superior): enlaces a documentación, repositorio y tour guiado.
2. **Panel de menú** (izquierda): controles para la creación, operaciones y configuración de la visualización.
3. **Lienzo** (derecha): área de visualización interactiva con ReactFlow.



Figura 5.1: Partes principales de la interfaz de usuario.

5.1.1 Componente orquestador (`page.tsx`)

El archivo `src/app/sll/page.tsx` es el componente principal del módulo de listas enlazadas. Sus responsabilidades son:

- Gestionar las 20 variables de estado (ver Sección 3.3).
- Coordinar los tres *custom hooks* (`useListOperations`, `useListVisualization`, `useListInitialization`).
- Definir los manejadores de eventos que conectan el menú con las operaciones.
- Renderizar la estructura de la página: `Navbar`, `Menu` y el lienzo `ReactFlow`.

5.1.2 Nodo de lista (`LinkedListNode`)

El componente `LinkedListNode` (`src/app/sll/LinkedListNode.tsx`) renderiza cada elemento de la lista enlazada como un rectángulo dividido en dos secciones:

Sección de datos (valor del nodo)	Puntero (next →)
--------------------------------------	---------------------

- **Sección de datos** (70% del ancho): muestra el valor del nodo con un fondo semitransparente blanco sobre el color de fondo del nodo.
- **Sección de puntero** (30% del ancho): representa el puntero `next`. Al posicionar el cursor sobre esta sección, el fondo cambia a rojo (#F44336) y la arista saliente se resalta.

Las dimensiones mínimas son 72x36 píxeles, con bordes redondeados y un divisor vertical entre las dos secciones. Figura 5.2 muestra un ejemplo de nodo de lista enlazada renderizado.

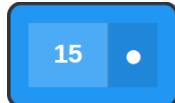


Figura 5.2: Ejemplo de nodo de datos en el lienzo.

5.1.3 Nodo circular (`CircleNode`)

El componente `CircleNode` (`src/app/sll/CircleNode.tsx`) renderiza los nodos de tipo puntero como círculos de 45x45 píxeles con fondo naranja (#FF5722).

Características interactivas:

- **Doble clic**: activa el modo de edición de la etiqueta.
- **Entrada de texto**: máximo 3 caracteres. Se confirma con Enter o al perder el foco, y se cancela con Escape.
- **Hover**: al posicionar el cursor sobre el nodo, se invoca `onPointerHover` para resaltar la arista conectada.



Figura 5.3: Ejemplo de nodo circular para señalar el primer elemento de la lista.

5.2 Sistema de menús

El panel de menú se implementa como un componente jerárquico compuesto por varias capas.

5.2.1 Estructura del menú

```
Menu (panel lateral, 288px de ancho)
└── MenuHeader (encabezado animado, fijo)
└── ListCreation (sección colapsable)
    ├── Pestaña Empty      → botón "Create Empty List"
    ├── Pestaña Random    → slider de cantidad + "Generate Random"
    └── Pestaña Custom     → entrada JSON + "Create From Sequence"
└── Operations (sección colapsable)
    ├── Insert            → At Head, At Position, At Tail, At Tail (01)
    ├── Remove            → Head, Tail, Position
    ├── Access             → Front, Back, Nth
    ├── Search             → entrada de valor + botón
    └── Algorithms         → Traverse, Reverse, Find Middle,
                                Get Length, Remove Duplicates
└── Programmer Tools (sección colapsable)
    ├── Show head and tail pointers
    └── Add pointer
└── Display Options (sección colapsable)
    ├── Speed              → slider (10-100, mapeado a 10-1000ms)
    ├── Colors             → selectores de color (Standard, New, Active)
    ├── Highlights          → Head / Tail toggles
    ├── Layout              → Scramble + Auto Layout
    └── Canvas              → Auto Adjust toggle
```

5.2.2 Componente Section

El componente reutilizable `Section` (`src/components/menu/Section.tsx`) implementa una sección colapsable con:

- Un encabezado que muestra un ícono (Lucide), un título y un indicador de chevron que rota al expandir/colapsar.
- Animación suave de altura máxima (*max-height*) para la transición.
- Soporte para estado controlado y no controlado mediante las props `isOpen` y `defaultOpen`.

5.2.3 Componente MenuHeader

El encabezado del menú (`src/components/menu/MenuHeader.tsx`) incluye animaciones basadas en el progreso de desplazamiento (*scroll*):

- Tamaño dinámico del ícono que disminuye al desplazarse.
- Opacidad y rotación que cambian según la posición de scroll.
- Una barra de progreso con gradiente que indica la posición actual.

5.2.4 Sección de operaciones

La sección `Operations` (`src/components/menu/sections/Operations.tsx`) organiza las 16 operaciones en 5 subsecciones colapsables. Cada subsección sigue un patrón consistente:

1. **Entrada de valor:** campo de texto con botón de valor aleatorio (para operaciones que requieren un valor).
2. **Entrada de posición:** campo numérico con validación de rango (para operaciones que requieren una posición).
3. **Botones de acción:** uno por cada operación disponible.

Los botones de acción invocan `onVisualize(opIndex, value, position)`, que se propaga hasta el componente principal `page.tsx`.

5.3 Estilización con Tailwind CSS y Radix UI

5.3.1 Tailwind CSS

La aplicación utiliza **Tailwind CSS** con un enfoque *utility-first*. Las clases de utilidad se aplican directamente en los componentes JSX, evitando la necesidad de hojas de estilo separadas.

Para la gestión de clases condicionales se utiliza la función `cn()` definida en `src/lib/utils.ts`, que combina `clsx` (para lógica condicional) y `tailwind-merge` (para resolver conflictos entre clases de Tailwind):

```
import { clsx, type ClassValue } from "clsx";
import { twMerge } from "tailwind-merge";

export function cn(...inputs: ClassValue[]) {
  return twMerge(clsx(inputs));
}
```

5.3.2 Sistema de colores

El sistema de colores se basa en variables CSS con valores HSL, lo que permite una personalización global del tema. Las variables se definen en `src/app/globals.css`:

- `--background`, `--foreground`: colores base del fondo y texto.
- `--primary`, `--secondary`, `--accent`: colores de énfasis.
- `--destructive`: color para acciones destructivas.
- `--border`, `--ring`: colores de bordes y anillos de foco.

5.3.3 Componentes shadcn/ui

Los componentes atómicos de la interfaz (botones, entradas, *sliders*, *switches*, selectores) provienen de **shadcn/ui** y se encuentran en `src/components/ui/`. Estos componentes están construidos sobre primitives de **Radix UI**, que proporcionan accesibilidad y comportamiento estandarizado.

Los componentes personalizados (`custom-slider.tsx`, `custom-select.tsx`, `custom-toggle.tsx`, `custom-input.tsx`) envuelven los componentes de shadcn/ui con etiquetas, valores de visualización y estilos específicos del visualizador.

5.3.4 Diseño adaptativo

La interfaz utiliza un diseño de dos columnas con `flex`:

- El panel de menú tiene un ancho fijo de 288px con scroll vertical independiente.
- El lienzo ocupa el espacio restante (`flex-1`) y se adapta al tamaño de la ventana.

La barra de navegación es fija en la parte superior y el contenido principal ocupa la altura restante de la ventana (`h-screen`).

6. Despliegue y CI/CD

Este capítulo documenta el proceso de construcción, despliegue y el flujo de trabajo de integración continua del proyecto.

6.1 Requisitos de infraestructura

Uno de los objetivos del proyecto es que la herramienta tenga **costo cero** de operación: no requiere servidores propios, bases de datos ni ningún tipo de infraestructura de pago. Para los usuarios finales, el único requisito es disponer de un navegador web moderno; no se necesita instalar ningún software adicional.

Esta decisión orienta directamente la elección de GitHub Pages como plataforma de despliegue y de GitHub Actions como sistema de integración continua, ya que ambos servicios son gratuitos para repositorios públicos.

6.2 GitHub Pages

La aplicación se despliega como un sitio estático en **GitHub Pages**. Esto es posible gracias a la configuración de exportación estática de Next.js.

6.2.1 Configuración de Next.js

El archivo `next.config.mjs` define las siguientes opciones clave para el despliegue:

- **output: 'export'**: indica a Next.js que genere una exportación estática (aplicación de una sola página o SPA) en lugar de un servidor Node.js.
- **basePath: '/AlgorithmVisualizer'**: prefijo de ruta necesario para GitHub Pages, ya que el sitio se sirve desde un subdirectorio del dominio `github.io`.
- **assetPrefix: '/AlgorithmVisualizer'**: asegura que los recursos estáticos (JavaScript, CSS, imágenes) se carguen con la ruta correcta.
- **distDir: './build'**: directorio de salida de la construcción.

6.2.2 Enrutamiento del lado del cliente

Al ser una aplicación de una sola página (SPA), toda la navegación se maneja en el navegador. El archivo `public/_redirects` contiene la regla:

```
/* /index.html 200
```

Esta regla redirige todas las solicitudes al archivo `index.html`, permitiendo que el enrutador de Next.js maneje las rutas del lado del cliente.

6.3 Flujo de trabajo con GitHub Actions

El despliegue automatizado se configura en el archivo `.github/workflows/nextjs.yml`. El flujo se activa con cada `push` a la rama `master`.

6.3.1 Etapas del flujo

El `workflow` consta de dos `jobs` secuenciales:

6.3.1.1 1. Construcción (`build`)

1. **Checkout**: descarga el código fuente del repositorio.
2. **Detección del gestor de paquetes**: identifica automáticamente si el proyecto usa `npm` o `yarn` verificando la existencia de archivos de bloqueo.

3. **Configuración de Node.js:** instala Node.js v20 y configura el caché de dependencias.
4. **Configuración de Pages:** inyecta automáticamente el `basePath` en la configuración de Next.js y desactiva la optimización de imágenes del lado del servidor.
5. **Restauración de caché:** utiliza el caché de `.next/cache` para acelerar construcciones incrementales.
6. **Instalación de dependencias:** ejecuta `npm ci` para una instalación determinista.
7. **Construcción:** ejecuta `next build`, que compila TypeScript y genera la exportación estática en el directorio `./build`.
8. **Subida del artefacto:** empaqueta el directorio `./build` como artefacto de GitHub Pages.

6.3.1.2 2. Despliegue (deploy)

1. Descarga el artefacto generado en la etapa anterior.
2. Lo despliega en el entorno de GitHub Pages.
3. Genera la URL pública del sitio.

6.3.2 Control de concurrencia

El `workflow` utiliza un grupo de concurrencia (`pages`) que permite solo un despliegue simultáneo. Los despliegues en curso no se cancelan para evitar estados intermedios.

6.4 Proceso de construcción

6.4.1 Construcción de la aplicación

El comando de construcción principal es:

```
npm run build
```

Este ejecuta dos pasos secuenciales:

1. `tsc`: compila TypeScript y verifica que no existan errores de tipos.
2. `next build`: genera la exportación estática de la aplicación.

El resultado es el directorio `./build` que contiene todos los archivos HTML, JavaScript y CSS necesarios para servir la aplicación.

6.4.2 Construcción de la documentación

La documentación se construye por separado mediante Quarto:

```
npm run docs:build
```

Este comando ejecuta:

1. `cd doc/manual && quarto render`: genera la documentación del manual de usuario en HTML y PDF.
2. `cd doc/design && quarto render`: genera el documento de diseño en HTML y PDF.
3. `npm run docs:sync`: copia los resultados a `public/docs/manual/` y `public/docs/design/` respectivamente.

La documentación debe construirse **antes** de la construcción de la aplicación, ya que los archivos generados en `public/docs/` se incluyen en la exportación estática de Next.js.

6.4.3 Flujo completo de despliegue

Para un despliegue completo que incluya documentación actualizada:

```
# 1. Construir la documentación
npm run docs:build

# 2. Construir la aplicación (incluye public/docs/)
npm run build

# 3. Confirmar y enviar los cambios
git add .
git commit -m "Update build"
git push
```

El `push` a `master` activa automáticamente el `workflow` de GitHub Actions que despliega el sitio.

6.5 Estructura de URLs desplegadas

Una vez desplegada, la aplicación es accesible en las siguientes rutas:

Ruta	Contenido
/AlgorithmVisualizer/sll	Visualizador de listas
/AlgorithmVisualizer/about	Página «Acerca de»
/AlgorithmVisualizer/docs/manual/index.html	Manual de usuario (HTML)
/AlgorithmVisualizer/docs/design/index.html	Documento de diseño (HTML)

7. Pruebas de validación y evaluación de impacto pedagógico

Para validar la utilidad, usabilidad y el impacto pedagógico de la herramienta *DSViz: Listas enlazadas*, se realizó una prueba de campo con una muestra de 15 estudiantes de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), del programa de Ingeniería de Sistemas y Computación.

7.1 Metodología de Validación

La validación se llevó a cabo mediante una encuesta estructurada que evaluó cuatro dimensiones críticas: usabilidad de la interfaz, eficacia en la transferencia de conocimiento, motivación del estudiante y comparación frente a métodos tradicionales de enseñanza.

Adicionalmente se utilizó la encuesta para recopilar información sobre posibles mejoras y características adicionales que los estudiantes consideraran valiosas.

A continuación se detallan las preguntas y se adjunta su justificación. La primera sección tiene como objetivo recolectar información que permita caracterizar la población.

Preguntas

1. Semestre actual.
2. ¿Habías estudiado listas enlazadas antes de usar esta herramienta?

La segunda sección evalúa la *usabilidad* del software. Contiene tres preguntas que se responden en una escala de 1 a 5. Se pregunta por el nivel de acuerdo en que el encuestado se encuentra con las afirmaciones.

Preguntas

3. La interfaz de la herramienta es intuitiva y fácil de usar.
4. Las instrucciones para realizar operaciones son claras.
5. La navegación entre las diferentes funciones es sencilla.

La tercera sección evalúa el impacto del software en el aprendizaje. De nuevo utiliza la escala de 1 a 5 y se le pide al encuestado indicar su nivel de acuerdo con las afirmaciones.

Preguntas

6. La herramienta le ayudó a comprender qué es una lista enlazada.
7. Logró entender mejor *qué hacen* las diferentes operaciones de las listas enlazadas.
8. Logró entender mejor *cómo funcionan* las diferentes operaciones de las listas enlazadas.
9. Considera que puede explicar a otras personas las operaciones de listas enlazadas.

La cuarta sección indaga al encuestado para que compare el enfoque del software con otros métodos de aprendizaje. En este caso son dos preguntas con sus respectivas opciones de respuesta. En el caso de la primera pregunta es de única respuesta y para la segunda puede seleccionar más de una.

Preguntas

10. Considera que la visualización con gráficas de la herramienta frente al aprendizaje editando y ejecutando código fuente es:

- Mucho más efectiva.
- Más efectiva.
- Igual de efectiva.
- Menos efectiva.

11. ¿Cuál método de aprendizaje prefiere para entender estructuras de datos? (Puedes seleccionar varios)

- Lectura de libros/documentación.
- Explicación del profesor.
- Visualizadores interactivos como este.
- Implementar el código por cuenta propia.
- Videos o tutoriales.
- Otros (especificar).

La quinta sección busca indagar por la motivación al uso de la herramienta. De nuevo, se muestran cinco afirmaciones y se le pide indicar el nivel de acuerdo en valores de 1 a 5.

Preguntas

12. Usar la herramienta hizo el aprendizaje más interesante.

13. Me sentí motivado(a) a experimentar con diferentes operaciones.

14. La herramienta redujo mi frustración al aprender el tema.

15. Recomendaría esta herramienta a otros estudiantes.

16. Me gustaría usar herramientas similares para otros temas.

Finalmente, la sexta sección es abierta y busca obtener retroalimentación.

Preguntas

17. En general, ¿cómo calificarías la herramienta?

- Excelente.
- Muy buena.
- Buena.
- Regular.
- Mala.

18. ¿Qué aspectos mejorarías de la herramienta?

19. ¿Qué otras estructuras de datos te gustaría visualizar con una herramienta similar?

20. Comentarios adicionales.

7.2 Resultados

7.2.1 Caracterización de la muestra

La encuesta fue respondida por 15 estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas y Computación de la UTP. La Tabla 7.1 muestra la distribución por semestre.

Tabla 7.1: Distribución de la muestra por semestre

Semestre	Estudiantes
5	8
7	3
8	1
10	3
Total	15

El 100% de los encuestados (15/15) había estudiado listas enlazadas antes de usar la herramienta, lo que convierte a la muestra en un grupo con conocimiento previo del tema y con capacidad para comparar el aprendizaje basado en la herramienta frente a métodos que ya conocían. La idea de extender la encuesta a estudiantes de semestres posteriores al semestre donde se dicta el curso de estructuras de datos tenía varios fines.

- Permitir que los estudiantes tuvieran un conocimiento previo del tema para poder comparar el aprendizaje basado en la herramienta frente a métodos tradicionales.
- Obtener retroalimentación de estudiantes que ya han pasado por el curso de estructuras de datos y que pueden aportar una perspectiva más crítica sobre la herramienta.
- Validar que la herramienta es útil no solo para estudiantes que están aprendiendo el tema por primera vez, sino también para aquellos que ya tienen experiencia y pueden usarla como una herramienta de repaso.

7.2.2 Usabilidad

Las tres afirmaciones de usabilidad fueron evaluadas en escala de 1 a 5. Los resultados se resumen en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Resultados de usabilidad (escala 1–5, n = 15)

Afirmación	Media
La interfaz es intuitiva y fácil de usar	4.67
Las instrucciones para realizar operaciones son claras	4.60
La navegación entre las funciones es sencilla	4.80

Las tres dimensiones de usabilidad obtuvieron promedios superiores a 4.5 sobre 5, con la navegación como el ítem mejor valorado (4.80). Estos resultados indican que la interfaz es percibida como intuitiva y fácil de usar por la amplia mayoría de los estudiantes.

7.2.3 Impacto en el aprendizaje

La Tabla 7.3 presenta los promedios de las cuatro afirmaciones de la sección de impacto en el aprendizaje.

Tabla 7.3: Resultados de impacto en el aprendizaje (escala 1–5, n = 15)

Afirmación	Media
La herramienta ayudó a comprender qué es una lista enlazada	4.67
Entendió mejor <i>qué hacen</i> las operaciones	4.67
Entendió mejor <i>cómo funcionan</i> las operaciones	4.33
Puede explicar las operaciones a otras personas	4.60

El ítem con menor valoración fue la comprensión de *cómo funcionan* las operaciones internamente (4.33), lo cual es esperable dado que la herramienta prioriza la visualización del comportamiento observable por encima de la implementación interna. Aun así, todos los promedios superan el 4.3, indicando un impacto positivo y consistente en el aprendizaje.

7.2.4 Comparación con el aprendizaje basado en código

Cuando se les preguntó cómo perciben la visualización gráfica frente al aprendizaje editando y ejecutando código fuente, el 100% de los estudiantes valoró la herramienta como igual o más efectiva:

Tabla 7.4: Comparación con el aprendizaje basado en código (n = 15)

Opción	Estudiantes	Porcentaje
Mucho más efectiva	11	73%
Más efectiva	4	27%
Igual de efectiva	0	0%
Menos efectiva	0	0%

Ningún estudiante consideró el enfoque visual menos efectivo que la programación, lo que respalda la premisa central de la herramienta.

7.2.5 Métodos de aprendizaje preferidos

La pregunta de selección múltiple sobre métodos de aprendizaje preferidos arrojó los siguientes resultados:

Tabla 7.5: Métodos de aprendizaje preferidos (selección múltiple, n = 15)

Método	Estudiantes	Porcentaje
Visualizadores interactivos	15	100%
Implementar el código por cuenta propia	11	73%
Explicación del profesor	10	67%
Videos o tutoriales	7	47%
Lectura de libros/documentación	3	20%

Los visualizadores interactivos fueron seleccionados por la totalidad de los encuestados (100%), siendo el único método con selección unánime. Le siguen la implementación de código (73%) y la explicación del profesor (67%), lo que sugiere que la herramienta es percibida como un complemento natural al aprendizaje activo y a la enseñanza presencial.

7.2.6 Motivación

La Tabla 7.6 resume los resultados de la sección de motivación.

Tabla 7.6: Resultados de motivación (escala 1–5, n = 15)

Afirmación	Media
La herramienta hizo el aprendizaje más interesante	4.73
Se sintió motivado a experimentar con las operaciones	4.73
La herramienta redujo su frustración al aprender el tema	4.40
Recomendaría la herramienta a otros estudiantes	4.87
Le gustaría usar herramientas similares para otros temas	4.73

El ítem de mayor puntaje es la intención de recomendar la herramienta (4.87), seguido de la motivación a experimentar y el interés en herramientas similares (4.73). La reducción de frustración obtuvo el puntaje más bajo de esta sección (4.40), aunque sigue siendo una valoración muy positiva.

7.2.7 Calificación general

La distribución de calificaciones globales se presenta en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7: Calificación general de la herramienta (n = 15)

Calificación	Estudiantes	Porcentaje
Excelente	6	40%
Muy buena	7	47%
Buena	2	13%
Regular	0	0%
Mala	0	0%

El 87% de los estudiantes calificó la herramienta como *Excelente* o *Muy buena*. Ningún estudiante la calificó como Regular o Mala.

7.2.8 Retroalimentación cualitativa

7.2.8.1 Aspectos a mejorar

Los estudiantes identificaron varios aspectos de mejora. El más mencionado (por 3 estudiantes) fue el comportamiento visual de la inserción *At Position*: el nodo insertado aparece desplazado respecto a su posición lógica en la lista y solo se acomoda correctamente al usar *Auto Layout* manualmente. Otros aspectos mencionados:

- **Sensibilidad del slider de nodos aleatorios:** difícil de ajustar con precisión, especialmente en portátil. Se sugirió complementarlo con un campo numérico directo.
- **Descripción de la operación en curso:** mostrar un texto explicativo durante la animación para facilitar la comprensión de lo que ocurre en cada paso.
- **Adaptación a dispositivos móviles:** la interfaz no está optimizada para pantallas pequeñas.
- **Tour inicial o videotutorial:** algunos estudiantes sugirieron un recorrido guiado introductorio (la herramienta ya incluye un tour con *driver.js*, aunque no todos lo descubrieron).
- **Modo ejercicio:** un estudiante propuso incluir ejercicios interactivos donde el estudiante construya la lista y la herramienta evalúe el resultado.

Los aspectos anteriores que señalan fallas de la aplicación ya se han efectuado en la versión actual del programa como parte del ciclo de desarrollo de software.

7.2.8.2 Estructuras de datos solicitadas

Las estructuras más solicitadas para futuras versiones de la herramienta fueron:

- **Árboles** (especialmente árboles Rojo-Negro y BST): mencionados por 7 estudiantes.
- **Grafos**: mencionados por 3 estudiantes.
- **Pilas y colas**: mencionadas por 2 estudiantes.
- **Listas circulares, Hash tables y algoritmos de ordenamiento**: mencionados por 1 estudiante cada uno.

Es importante aclarar que estas respuestas serán tenidas en cuenta para desarrollos futuros pero que en sí mismas pueden requerir desarrollos incluso más grandes de los presentados para listas enlazadas. En todo caso se listan aquí porque se consideran contribuciones valiosas que trazan posibles desarrollos futuros de otras herramientas.

7.3 Conclusiones de la validación

Los resultados de la validación con 15 estudiantes evidencian que *DSViz: Listas enlazadas* cumple satisfactoriamente sus objetivos pedagógicos y de usabilidad:

1. **Alta usabilidad**: las tres dimensiones evaluadas alcanzan o superan el 4.5/5, lo que confirma que la interfaz es intuitiva y accesible sin necesidad de formación previa.
2. **Impacto positivo en el aprendizaje**: los promedios de comprensión oscilan entre 4.33 y 4.67/5. El ítem de comprensión interna de las operaciones (4.33) es el más bajo, coherente con el enfoque de la herramienta en la visualización del comportamiento observable.
3. **Superioridad percibida frente al código**: el 100% de los encuestados considera la visualización gráfica al menos tan efectiva como el aprendizaje por código. El 73% la considera *mucho más efectiva*.
4. **Alta motivación**: la intención de recomendar la herramienta obtuvo el mayor puntaje de toda la encuesta (4.87/5), y el 100% seleccionó los visualizadores interactivos como su método de aprendizaje preferido.
5. **Retroalimentación accionable**: los estudiantes identificaron errores visuales concretos y funcionalidades de alto valor para futuras iteraciones, en especial el comportamiento de la inserción *At Position* y la adición de descripciones durante las animaciones.