

Diseño e implementación de TADs lineales¹

Empieza por el principio –dijo el Rey con gravedad – y sigue hasta llegar al final; allí te paras.

Lewis Carroll definiendo, sin pretenderlo, el recorrido de una estructural lineal en Alicia en el país de las maravillas.

RESUMEN: En este tema se presentan los TADs lineales, dando al menos una implementación de cada uno de ellos. Se presenta también el concepto de iterador que permite recorrer una colección de objetos y se extiende el TAD lista para que soporte recorrido y modificación mediante iteradores.

1. Motivación

El agente 0069 ha inventado un nuevo método de codificación de mensajes secretos. El mensaje original X se codifica en dos etapas:

1. X se transforma en X' reemplazando cada sucesión de caracteres consecutivos que no sean vocales por su imagen especular.
2. X' se transforma en la sucesión de caracteres X'' obtenida al ir tomando sucesivamente: el primer carácter de X' , luego el último, luego el segundo, luego el penúltimo, etc.

Ejemplo: para $X = \text{"Bond, James Bond"}$, resultan:

$X' = \text{"BoJ ,dnameB sodn"}$

y

$X'' = \text{"BnodJo s, dBneam"}$

¿Serías capaz de implementar los algoritmos de codificación y decodificación?

¹Marco Antonio Gómez es el autor principal de este tema.

Apostamos que sí; inténtalo. A buen seguro te dedicarás a utilizar vectores de caracteres y enteros a modo de “índice” a los mismos. En este tema aprenderás a hacerlo de una forma mucho más fácil gracias a los TADs lineales. Al final del tema vuelve a implementarlo y compara las dos soluciones.

2. Estructuras de datos lineales

Antes de plantearnos los distintos tipos abstractos de datos lineales nos planteamos cómo podemos guardar en memoria una colección de datos lineal. Hay dos aproximaciones básicas:

- Todos los elementos de forma consecutiva en la memoria: array de elementos.
- Elementos dispersos en memoria guardando enlaces entre ellos: listas enlazadas.

Cada una de las alternativas tiene sus ventajas y desventajas. Las implementaciones de los TADs lineales que veremos en el tema podrán hacer uso de una u otra estructura de datos; la elección de una u otra podrá influir en la complejidad de sus operaciones.

Veamos cada una de ellas. Es importante hacer notar que estamos hablando aquí de *estructuras de datos* o estrategias para almacenar información en memoria. Por eso *no* planteamos de forma exhaustiva qué operaciones vamos a tener, ni el invariante de la representación ni relación de equivalencia. Introducimos aquí simplemente los métodos típicos que las implementaciones de los TADs que hacen uso de estas estructuras de datos suelen incorporar para el manejo de la propia estructura.

2.1. Array de elementos

La idea fundamental es guardar todos los elementos en un array utilizando el tipo primitivo del lenguaje. Dado que un vector *no* puede cambiar de tamaño una vez creado, se impone desde el momento de la creación un *límite* en el número de elementos que se podrán almacenar; de ellos solo los n primeros tendrán información útil (el resto debe verse como espacio reservado para almacenar otros elementos en el futuro).

Para superar la limitación del tamaño fijo es habitual hacer uso de *arrays dinámicos*: se crea un *array* en la memoria dinámica capaz de albergar un número fijo de elementos; cuando el array se llena se construye un nuevo *array* más grande, se copian los elementos y se elimina el antiguo.

2.1.1. Definición de tipos

Las implementaciones que quieran hacer uso de esta estructura de datos utilizan normalmente tres atributos:

- Puntero al array almacenado en memoria dinámica.
- Tamaño de ese array (o lo que es lo mismo, número de elementos que podría almacenar como máximo).
- Número de elementos ocupados actualmente. Los índices ocupados casi siempre se *condensan* al principio del array.

```

template <class T>
class VectorDinamico {
public:

    ...

protected:

    /** Puntero al array que contiene los datos. */
    T* array;

    /** Tamaño del vector array. */
    int capacidad;

    /** Número de elementos reales guardados. */
    int nelems;
};

```

2.1.2. Creación

La creación consiste en crear un vector con un tamaño inicial. En el código siguiente ese tamaño (definido en una constante) es 10.

```

template <class T>
class VectorDinamico {
public:

    /** Tamaño inicial del vector dinámico. */
    static const int TAM_INICIAL = 10;

    /** Constructor */
    VectorDinamico() :
        array(new T[TAM_INICIAL]),
        capacidad(TAM_INICIAL),
        nelems(0) {

    }

    ...

};

```

2.1.3. Operaciones sobre la estructura de datos

Las operaciones relevantes en esta estructura de datos son:

- Método para ampliar el vector: cuando el TAD quiera añadir un nuevo elemento en el vector pero esté ya lleno debe crear un vector nuevo. Para que el coste amortizado de las inserciones sea constante el tamaño del vector *se dobla*².

²El coste amortizado se utiliza cuando una función presenta costes muy distintos en distintas llamadas y se quiere obtener un coste más preciso que el caso peor de la función. En ese caso se calcula el caso peor de una secuencia de llamadas a la función. Decir que una función requiere un tiempo amortizado constante significa que para cualquier secuencia de n llamadas, el tiempo total de la secuencia está acotado superiormente por cn , para una cierta constante $c > 0$. Se permite por tanto un tiempo excesivo para una

- Al eliminar un elemento intermedio del vector hay que *desplazar* los elementos que quedan a la derecha del eliminado.

```

template <class T>
class VectorDinamico {

    ...

protected:

    /**
     * Duplica el tamaño del vector.
     */
    void amplia() {
        T* viejo = array;
        capacidad *= 2;
        array = new T[capacidad];

        for (int i = 0; i < nelems; ++i)
            array[i] = viejo[i];

        delete[] viejo;
    }

    /**
     * Elimina un elemento del vector; compacta los elementos
     * al principio del vector.
     * @param pos En el intervalo 0..numElems-1.
     */
    void quitaElem(int pos) {
        assert((0 <= pos) && (pos < nelems));

        --nelems;
        for (int i = pos; i < nelems; ++i)
            array[i] = array[i+1];
    }

};

```

2.1.4. Destrucción

La destrucción requiere simplemente eliminar el vector creado en el constructor o en el método `amplia()`.

```

template <class T>
class VectorDinamico {
public:

    ...

    ~VectorDinamico() {
        delete[] array;
    }
};

```

llamada sólo si se han registrado tiempos muy breves anteriormente. En el caso de la inserción, el vector se dobla tras n inserciones de coste $\mathcal{O}(1)$, por lo que el coste de la secuencia sería $n * \mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(n) = \mathcal{O}(n)$. Puede entonces considerarse que el coste amortizado de cada inserción está en $\mathcal{O}(1)$.

```

    }
    ...
};

```

2.2. Nodos enlazados

En este caso cada elemento es almacenado en un espacio de memoria independiente (un *nodo*) y la colección completa se mantiene utilizando punteros. Hay dos alternativas:

- Nodos enlazados con enlace simple: cada nodo mantiene un puntero al siguiente elemento.
- Nodos enlazados con enlace doble: cada nodo mantiene dos punteros: un puntero al nodo siguiente y al nodo anterior.

Aquí aparece la implementación de esta segunda opción, por ser más versátil. No obstante en ciertas implementaciones de TADs esa versatilidad no aporta ventajas adicionales (por ejemplo en las pilas), por lo que será más eficiente (en cuanto a consumo de memoria) el uso de enlace simple.

2.2.1. Definición de tipos

Dependiendo del TAD que utilice esta estructura de datos, sus atributos serán distintos. Todas las implementaciones tendrán, eso sí, la definición de la clase `Nodo` que es la que almacena por un lado el elemento y por otro lado los punteros al nodo siguiente y al nodo anterior. Esa clase en C++ la implementaremos como una clase interna.

```

template <class T>
class ListaEnlazada {
public:

    ...

protected:

    /**
     * Clase nodo que almacena internamente el elemento (de tipo T),
     * y dos punteros, uno al nodo anterior y otro al nodo siguiente.
     * Ambos punteros podrían ser nullptr si el nodo es el primero
     * y/o último de la lista enlazada.
     */
    class Nodo {
    public:
        Nodo() : sig(nullptr), ant(nullptr) {}
        Nodo(const T& elem) : elem(elem), sig(nullptr), ant(nullptr) {}
        Nodo(Nodo* ant, const T& elem, Nodo* sig) :
            elem(elem), sig(sig), ant(ant) {}

        T elem;
        Nodo* sig;
        Nodo* ant;
    };
};

```

2.2.2. Creación

Dado que una lista vacía no tiene ningún nodo, el proceso de creación solo implica inicializar los atributos que apuntan al primero/último de la lista a nullptr, para indicar la ausencia de elementos.

2.2.3. Operaciones sobre la estructura de datos

Hay dos operaciones: creación de un nuevo nodo y su inserción en la lista enlazada y eliminación.

- La inserción que implementaremos recibe dos punteros, uno al nodo anterior y otro al nodo siguiente al nodo nuevo a añadir; crea un nuevo nodo y lo devuelve. Notar que algunos de los punteros pueden ser nullptr (cuando se añade un nuevo nodo al principio o al final de la lista enlazada).
- La operación de borrado recibe únicamente el nodo a eliminar. La implementación utiliza el propio nodo para averiguar cuáles son los nodos anterior y siguiente para modificar sus punteros. Notese que si estuviéramos implementando una lista enlazada (y no doblemente enlazada) la operación necesitaría recibir un puntero al nodo anterior.

```

template <class T>
class ListaEnlazada {

    ...

protected:

    /**
     * Inserta un elemento entre el nodo1 y el nodo2.
     * Devuelve el puntero al nodo creado.
     * Caso general: los dos nodos existen.
     *     nodo1->sig == nodo2
     *     nodo2->ant == nodo1
     * Casos especiales: alguno de los nodos no existe
     *     nodo1 == nullptr y/o nodo2 == nullptr
     */
    static Nodo* insertaElem(const T& e, Nodo* nodo1, Nodo* nodo2) {
        Nodo* nuevo = new Nodo(nodo1, e, nodo2);
        if (nodo1 != nullptr)
            nodo1->sig = nuevo;
        if (nodo2 != nullptr)
            nodo2->ant = nuevo;
        return nuevo;
    }

    /**
     * Elimina el nodo n. Si el nodo tiene nodos antes
     * o después, actualiza sus punteros anterior y siguiente.
     * Caso general: hay nodos anterior y siguiente.
     * Casos especiales: algunos de los nodos (anterior o siguiente
     * a n) no existen.
     */

```

```

static void borraElem(Nodo* n) {
    assert(n != nullptr);
    Nodo* ant = n->ant;
    Nodo* sig = n->sig;
    if (ant != nullptr)
        ant->sig = sig;
    if (sig != nullptr)
        sig->ant = ant;
    delete n;
}

};

```

2.2.4. Destrucción

La destrucción requiere ir recorriendo uno a uno todos los nodos de la lista enlazada y eliminándolos.

```

template <class T>
class ListaEnlazada {

    ...

protected:
    /**
     * Elimina todos los nodos de la lista enlazada cuyo
     * primer nodo se pasa como parámetro.
     * Se admite que el nodo sea nullptr (no habrá nada que
     * liberar). En caso de pasarse un nodo válido,
     * su puntero al nodo anterior debe ser nullptr (si no,
     * no sería el primero de la lista!).
     */
    static void libera(Nodo* prim) {
        assert((prim == nullptr) || (prim->ant == nullptr));

        while (prim != nullptr) {
            Nodo* aux = prim;
            prim = prim->sig;
            delete aux;
        }
    }
};

```

Con esto terminamos el análisis de las dos estructuras de datos que utilizaremos para guardar en memoria los elementos almacenados en los TADs lineales que veremos a lo largo del tema. Aunque en las explicaciones anteriores hemos hecho uso de las clases `VectorDinamico` y `ListaEnlazada`, en la práctica tendremos las clases que implementan los distintos TADs y que tendrán los atributos o clases internas y los métodos que hemos descrito aquí.

2.3. En el mundo real...

Las estructuras de datos que hemos visto en este apartado se utilizarán en la implementación de los TADs que veremos a continuación. Lo mismo ocurre en las librerías de

colecciones de lenguajes como C++ o Java. Nosotros no nos preocuparemos de la reutilización aquí, por lo que el código de gestión de estas estructuras estará repetido en todas las implementaciones de los TADs que veamos. En una implementación sería esta aproximación sería inadmisibles. Por poner un ejemplo de diseño correcto, la librería de C++ tiene implementadas estas dos estructuras de datos a las que llama *contenedores* (son la clase `std::vector` y `std::list`). Las implementaciones de los distintos TADs son después parametrizadas con el tipo de contenedor que se quiere utilizar. Dependiendo de la elección, la complejidad de cada operación variará.

Desde el punto de vista de la eficiencia de las estructuras de datos el vector dinámico tiene un comportamiento que no querríamos en un desarrollo serio. En concreto, la inocente:

```
array = new T[capacidad];
```

que aparece en el constructor lo que provoca es la llamada al constructor de la clase `T` base, de forma que cuando se construye un vector dinámico *vacío* se *crean* un puñado de elementos. Utilizando técnicas de C++ se puede retrasar la invocación a esos constructores hasta el momento de la inserción.

Peor aún es el momento del borrado de un elemento: cuando se elimina un elemento se desplaza el resto una posición hacia la izquierda pero *ese desplazamiento se realiza mediante copia*, por lo que el último elemento del vector queda *duplicado*, y no se destruirá hasta que no se elimine por completo el vector en el

```
delete[] array;
```

La última pega de los vectores dinámicos es el consumo de memoria. Los vectores crecen indefinidamente, nunca decrecen. Si un vector almacena puntualmente muchos elementos pero después se suprimen todos ellos el consumo de memoria no disminuye³. En la librería de C++ existe otro tipo de contenedor (`std::deque`) que no sufre este problema.

Por último, en nuestra implementación (y en las implementaciones de los TADs que veremos en las secciones siguientes) hemos obviado métodos recomendables (e incluso necesarios) en las clases de C++ como el constructor por copia, operaciones de igualdad, etc. En las implementaciones proporcionadas como material adicional a estos apuntes aparecerán implementados todos esos métodos, pero no los describiremos aquí por entender que son detalles de C++ no relevantes para la parte de teoría.

3. El TAD vector

El TAD `vector` es el contenedor de datos lineal más conocido y utilizado. Abstrae a los arrays dotándolos de gestión propia de memoria (redimensión cuando es necesario). Permite por tanto acceso directo por índice a sus elementos tanto para lectura como para modificación. Además los extiende con operaciones extra como la inserción (abriendo hueco) y eliminación (cerrándolo). A parte de dos constructoras (una que construye un vector vacío y otra que lo crea con el número de elementos indicado), la constructora por copia, operador de asignación y destructora, incluye las siguientes operaciones: `operator[]`, `push_back`, `pop_back`, `insert`, `erase`, `empty`, `size` y `resize`.

³Esta desventaja, no obstante, es un problema de nuestra implementación; para solucionarlo, con hacer que cuando el vector pierde un número suficiente de elementos, su tamaño se reduce automáticamente en una función inversa a `amplia()`. Si se hace un análisis del coste amortizado similar al utilizado para la inserción se llegaría a la misma conclusión: las operaciones siguen siendo $\mathcal{O}(1)$.

3.1. Implementación

Utilizaremos como estructura de datos un puntero al array dinámico redimensionable (según lo visto en el apartado 2.1), que almacena los elementos del vector, y dos enteros: el número de elementos almacenados y la capacidad actual del array (como vimos en la sección 2.1).

El *invariante de la representación*, o lo que es lo mismo las condiciones que deben cumplir los objetos de la clase para considerarse válidos, para un vector v cuyos elementos son de tipo T es:

$$\begin{aligned}
 &R_{\text{vector}_T}(v) \\
 \iff_{\text{def}} &0 \leq v.\text{nelems} \leq v.\text{capacidad} \wedge \\
 &\forall i : 0 \leq i < v.\text{nelems} : R_T(v.\text{array}[i])
 \end{aligned}$$

También es lícito plantearnos cuándo dos objetos que utilizan la misma implementación representan a vectores idénticos. Es lo que se llama relación de equivalencia que permite averiguar si dos objetos válidos (es decir, que cumplen el invariante de la representación) son iguales. En este caso concreto dos vectores son iguales si el número de elementos almacenados coincide y sus valores respectivos, uno a uno, también (independientemente de la capacidad interna que tengan):

$$\begin{aligned}
 &v1 \equiv_{\text{vector}_T} v2 \\
 \iff_{\text{def}} &v1.\text{nelems} = v2.\text{nelems} \wedge \\
 &\forall i : 0 \leq i < v1.\text{nelems} : v1.\text{array}[i] \equiv_T v2.\text{array}[i]
 \end{aligned}$$

La implementación quedaría como sigue:

```

template <class T>
class vector {
protected:
    static const int TAM_INI = 10; // tamaño por defecto del array dinámico

    // número de elementos reales del vector
    int nelems;

    // tamaño del array
    int capacidad;

    // puntero al array que contiene los datos (redimensionable)
    T* array;

public:

    // constructor: vector vacío
    vector() : nelems(0), capacidad(TAM_INI), array(new T[capacidad]) {}

    // constructor: vector con n elementos ocupados y capacidad n
    vector(int n) : nelems(n), capacidad(n), array(new T[capacidad]) {}

```

```

// destructor
~vector() {
    libera();
}

// constructor por copia
vector(vector<T> const& other) {
    copia(other);
}

// operador de asignación
vector<T>& operator=(vector<T> const& other) {
    if (this != &other) {
        libera();
        copia(other);
    }
    return *this;
}

// añade un elemento al final. O(1) amortizado
void push_back(T const& elem) {
    if (nelems == capacidad)
        amplia(capacidad*2);
    array[nelems] = elem;
    ++nelems;
}

// quita el último elemento. O(1)
void pop_back() {
    if (nelems > 0) --nelems;
}

// devuelve referencia constante a elemento en pos i. O(1)
const T& operator[](int i) const {
    if (i < 0 || i >= nelems)
        throw std::out_of_range("índice no válido");
    return array[i];
}

// devuelve referencia a elemento en posición i. O(1)
T& operator[](int i) {
    if (i < 0 || i >= nelems)
        throw std::out_of_range("índice no válido");
    return array[i];
}

// inserta e en pos i desplazando para abrir hueco. O(nelems)
void insert(const T& e, int i) {
    if (i < 0 || i >= nelems)
        throw std::out_of_range("índice no válido");
    if (nelems == capacidad) amplia(capacidad*2);
    desplazaDchaDesde(i);
    array[i] = e;
    ++nelems;
}

```

```

// borra elemento de pos i (desplaza para cerrar hueco). O(nelems)
void erase(int i){
    if (i < 0 || i >= nelems)
        throw std::out_of_range("indice no valido");
    desplazaIzdaDesde(i);
    --nelems;
}

// consulta si el vector es vacío. O(1)
bool empty() const {
    return nelems == 0;
}

// consulta el tamaño del vector. O(1)
int size() const {
    return nelems;
}

// cambia tamaño del vector dando mas capacidad si necesario. O(nelems)
void resize(int n) {
    if (n < 0) throw std::out_of_range("parametro no valido");
    if (n <= nelems) nelems = n;
    // No se redimensiona hacia abajo, aunque se podría hacer
    else {
        amplia(n);
        nelems = n;
    }
}

```

protected:

```

void libera() {
    delete[] array;
}

// this está sin inicializar
void copia(vector const& other) {
    capacidad = other.nelems + TAM_INI;
    nelems = other.nelems;
    array = new T[capacidad];
    for (int i = 0; i < nelems; ++i)
        array[i] = other.array[i];
}

void amplia(int nuevaCapacidad) {
    T* viejo = array;
    capacidad = nuevaCapacidad;
    array = new T[capacidad];
    for (int i = 0; i < nelems; ++i)
        array[i] = std::move(viejo[i]);
    delete[] viejo;
}

void desplazaDchaDesde(int i){
    for (int j = nelems; j > i; j--)
        array[j] = array[j-1];
}

```

```

    }

    void desplazaIzdaDesde(int i) {
        for (; i < nelems-1; i++)
            array[i] = array[i+1];
    }

};

```

4. Pilas

Una pila representa una colección de valores donde es posible acceder al último elemento añadido, implementando la idea intuitiva de *pila* de objetos.

El TAD *pila* tiene dos operaciones generadoras: la que crea una pila vacía y la que apila un nuevo elemento en una pila dada. Tiene además una operación modificadora que permite desapilar el último objeto (y que es parcial, pues si la pila está ya vacía falla) y al menos dos operaciones observadoras: la que permite acceder al último elemento añadido (también parcial) y la que permite averiguar si una pila tiene elementos.

Las pilas tienen muchas utilidades, como por ejemplo “dar la vuelta” a una secuencia de datos (ver ejercicio 1).

4.1. Implementación de pilas con vector dinámico

En esta implementación se utiliza como estructura de datos un vector dinámico que almacena en sus primeras posiciones los elementos almacenados en la pila y que duplica su tamaño cuando se llena (según lo visto en el apartado 2.1).

Por lo tanto, el tipo representante tendrá tres atributos: el puntero al vector, el número de elementos almacenados y el tamaño máximo del vector que ya utilizamos en la sección 2.1 llamados `array`, `nelems` y `capacidad`. Notar que `array[nelems-1]` es el elemento de la cima de la pila.

El *invariante de la representación*, o lo que es lo mismo las condiciones que deben cumplir los objetos de la clase para considerarse válidos, para una pila `p` cuyos elementos son de tipo `T` es:

$$\begin{aligned}
 & R_{Stack_T}(p) \\
 \iff_{def} & 0 \leq p.nelems \leq p.capacidad \wedge \\
 & \forall i : 0 \leq i < nelems : R_T(p.array[i])
 \end{aligned}$$

También es lícito plantearnos cuándo dos objetos que utilizan la misma implementación representan a pilas idénticas. Es lo que se llama relación de equivalencia que permite averiguar si dos objetos válidos (es decir, que cumplen el invariante de la representación) son iguales. En este caso concreto dos pilas son iguales si el número de elementos almacenados coincide y sus valores respectivos, uno a uno, también:

$$\begin{aligned}
 & p1 \equiv_{Stack_T} p2 \\
 \iff_{def} & \\
 & p1.nelems = p2.nelems \wedge \\
 & \forall i : 0 \leq i < p1.nelems : p1.array[i] \equiv_T p2.array[i]
 \end{aligned}$$

La implementación es sencilla basándonos en los métodos vistos anteriormente⁴:

```

template <class T>
class stack {
protected:
    static const int TAM_INICIAL = 10; // tamaño inicial del array dinámico

    // número de elementos en la pila
    int nelems;

    // tamaño del array
    int capacidad;

    // puntero al array que contiene los datos (redimensionable)
    T* array;

public:

    // constructor: pila vacía
    stack() : nelems(0), capacidad(TAM_INICIAL), array(new T[capacidad]) {}

    // destructor
    ~stack() {
        libera();
    }

    // apilar un elemento
    void push(T const& elem) {
        array[nelems] = elem;
        ++nelems;
        if (nelems == capacidad)
            amplia();
    }

    // consultar la cima
    T const& top() const {
        if (empty())
            throw std::domain_error("la pila vacia no tiene cima");
        return array[nelems - 1];
    }

    // desapilar el elemento en la cima
    void pop() {
        if (empty())
            throw std::domain_error("desapilando de la pila vacia");
    }

```

⁴Durante todo el tema utilizaremos métodos que ya han aparecido anteriormente; en una implementación *desde cero* es posible que el código de algunos de esos métodos apareciera directamente integrado en las operaciones en vez de utilizar un método auxiliar.

```

        --nelems;
    }

    // consultar si la pila está vacía
    bool empty() const {
        return nelems == 0;
    }

    // consultar el tamaño de la pila
    int size() const {
        return nelems;
    }

protected:
    ...
};

```

4.2. Implementación de pilas con una lista enlazada

La implementación con listas enlazadas consiste en almacenar como primer elemento de la lista el que aparece en la *cima* de la pila. La base de la pila se guarda en el último elemento de la lista. De esta forma:

- La clase `stack` necesita un único atributo: un puntero al nodo que contiene la cima (*cima*). Si la pila está vacía, el puntero valdrá `nullptr`.
- Dado que lo único que hacemos con la lista es insertar y borrar el primer elemento las listas enlazadas simples son suficiente.

El invariante debe garantizar que la secuencia de nodos termina en `nullptr` (eso garantiza que no hay ciclos) y que todos los nodos deben estar correctamente ubicados y almacenar un elemento del tipo base válido:

$$\begin{aligned}
 & R_{Stack_T}(p) \\
 \iff_{def} & \text{null} \in \text{cadena}(p.\text{cima}) \wedge \\
 & \forall n \in \text{cadena}(p.\text{cima}) : n \neq \text{null} \rightarrow (\text{ubicado}(n) \wedge R_T(n.\text{elem}))
 \end{aligned}$$

Donde `ubicado` es un predicado que viene a asegurar que se ha pedido memoria para el puntero (y ésta no ha sido liberada) y `cadena(ptr)` representa el conjunto de todos los nodos que forman la lista enlazada que comienza en `ptr`, incluido el posible “nodo nulo” representado por el valor `null`:

$$\begin{aligned}
 \text{cadena}(\text{ptr}) &= \{\text{null}\} & \text{si } \text{ptr} &= \text{null} \\
 \text{cadena}(\text{ptr}) &= \{\text{ptr}\} \cup \text{cadena}(\text{ptr}.\text{sig}) & \text{si } \text{ptr} &\neq \text{null}
 \end{aligned}$$

Tras el invariante, definimos la relación de equivalencia en la implementación: dos objetos pila serán iguales si su lista enlazada contiene el mismo número de elementos y sus valores uno a uno coinciden (están en el mismo orden):

$$\begin{aligned}
 & p1 \equiv_{Stack_T} p2 \\
 \iff_{def} & \\
 & iguales_T(p1.cima, p2.cima)
 \end{aligned}$$

donde

$iguales(ptr1, ptr2) = \text{true}$	si $ptr1 = \text{null} \wedge ptr2 = \text{null}$
$iguales(ptr1, ptr2) = \text{false}$	si $(ptr1 = \text{null} \wedge ptr2 \neq \text{null}) \vee$ $(ptr1 \neq \text{null} \wedge ptr2 = \text{null})$
$iguales(ptr1, ptr2) = ptr1.elem \equiv_T ptr2.elem \wedge$ $iguales(ptr1.sig, ptr2.sig)$	si $(ptr1 \neq \text{null} \wedge ptr2 \neq \text{null})$

La implementación aparece a continuación; el nombre de la clase lo hemos cambiado a `LinkedListStack` (pila implementada con listas enlazadas). En aras de la simplicidad omitimos los comentarios de los métodos (al implementar el mismo TAD y ser una implementación sin limitaciones, coinciden con los de la implementación con array dinámico):

```

template <class T>
class LinkedListStack {
public:

    LinkedListStack() : cima(nullptr), nelems(0) {
    }

    ~LinkedListStack() {
        libera();
        cima = nullptr;
    }

    void push(const T& elem) {
        cima = new Nodo(elem, cima);
        nelems++;
    }

    void pop() {
        if (empty())
            throw std::domain_error("desapilando de la pila vacia");
        Nodo* aBorrar = cima;
        cima = cima->sig;
        delete aBorrar;
        --nelems;
    }

    const T& top() const {
        if (empty())
            throw std::domain_error("la pila vacia no tiene cima");
        return cima->elem;
    }

    bool empty() const {
        return cima == nullptr;
    }
}

```

```

        // consultar el tamaño de la pila
        int size() const {
            return nelems;
        }

protected:
    /**
     * Clase nodo que almacena internamente el elemento (de tipo T),
     * y un puntero al nodo siguiente, que podría ser nullptr si
     * el nodo es el último de la lista enlazada.
     */
    class Nodo {
    public:
        Nodo() : sig(nullptr) {}
        Nodo(const T& elem) : elem(elem), sig(nullptr) {}
        Nodo(const T& elem, Nodo* sig) :
            elem(elem), sig(sig) {}

        T elem;
        Nodo* sig;
    };

    Nodo* cima;
    int nelems;
};

```

La complejidad de las operaciones de ambas implementaciones es similar⁵:

Operación	Vectores	Listas enlazadas
stack	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
push	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
pop	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
top	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
empty	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
size	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$

5. Colas

Las colas son TADs lineales que permiten introducir elementos por un extremo (el *final* de la cola) y las consultas y eliminaciones por el otro (el *inicio* de la cola). Es decir, son estructuras en las que el primer elemento que entra es el primero que saldrá; de ahí que también se las conozca como estructuras FIFO (del inglés, *first in, first out*).

Las operaciones de las colas son:

- Constructora: genera una cola vacía.
- push: añade un nuevo elemento a la cola.

⁵En todas las tablas de complejidades de operaciones de TADs que pondremos *asumiremos* que el tipo base tiene operaciones de construcción, destrucción y copia constantes $\mathcal{O}(1)$.

- `pop`: modificadora parcial que elimina el primer elemento de la cola. Falla si la cola está vacía.
- `front`: observadora parcial que devuelve el primer elemento de la cola (el más antiguo).
- `empty`: también observadora, permite averiguar si la cola tiene elementos.
- `size`: también observadora, devuelve el número de elementos de la cola.

5.1. Implementación de colas con un vector

Una posible implementación con un vector dinámico consistiría en hacer crecer el vector al ir llegando elementos, de forma que el primer elemento de la cola esté siempre en la posición 0 del vector.

La principal pega que tiene esa implementación es el coste de la operación `pop`: al eliminar el elemento debemos desplazar todos los elementos válidos una posición a la izquierda, elevando el coste de la operación a $\mathcal{O}(n)$.

El invariante de la representación y la relación de equivalencia de esta implementación es análoga a aquella vista para las pilas.

Existe una implementación sobre vectores más eficiente en la que la complejidad de la operación es $\mathcal{O}(1)$; ver el ejercicio 12.

5.2. Implementación de colas con una lista enlazada

Otra posible implementación de las colas es utilizando un esquema similar a aquél visto en las pilas: una lista enlazada en la que el primer nodo contiene el elemento que hay en la cabecera de la cola. Igual que ocurría en las pilas esa lista puede ser simple para ahorrarnos el espacio en memoria ocupado por los punteros a los nodos anteriores que no necesitamos.

Si hiciéramos la implementación nos daríamos cuenta de que la operación `push` tiene complejidad $\mathcal{O}(n)$ pues debemos recorrer todos los elementos almacenados en la lista para saber dónde colocar el nuevo nodo.

La forma de solucionarlo es hacer que la implementación almacene *dos punteros*: un puntero al primer nodo y otro puntero al último nodo.

El invariante de la representación es similar al visto en la implementación de las pilas, y la relación de equivalencia también.

La implementación es en cierto sentido algo incómoda pues tenemos que tener cuidado con los casos especiales en los que trabajamos con una cola vacía⁶.

```
template <class T>
class queue {
protected:

    // punteros al primer y último elemento
    Nodo* prim;
    Nodo* ult;

    // número de elementos en la cola
    int nelems;
```

⁶En el código no se aprecian todos los casos especiales gracias a las operaciones auxiliares implementadas en la sección 2.2 y que no mostramos de nuevo aquí.

```

public:

    // constructor: cola vacía
    queue() : prim(nullptr), ult(nullptr), nelems(0) {}

    // destructor
    ~queue() {
        libera();
    }

    // añadir un elemento al final de la cola
    void push(T const& elem) {
        Nodo* nuevo = new Nodo(elem);

        if (ult != nullptr)
            ult->sig = nuevo;
        ult = nuevo;
        if (prim == nullptr) // la cola estaba vacía
            prim = nuevo;
        ++nelems;
    }

    // consultar el primero de la cola
    T const& front() const {
        if (empty())
            throw std::domain_error("la cola vacia no tiene primero");
        return prim->elem;
    }

    // eliminar el primero de la cola
    void pop() {
        if (empty())
            throw std::domain_error("eliminando de una cola vacia");
        Nodo* a_borrar = prim;
        prim = prim->sig;
        if (prim == nullptr) // la cola se ha quedado vacía
            ult = nullptr;
        delete a_borrar;
        --nelems;
    }

    // consultar si la cola está vacía
    bool empty() const {
        return nelems == 0;
    }

    // consultar el tamaño de la cola
    int size() const {
        return nelems;
    }
};

```

La complejidad de las operaciones es distinta dependiendo de la estructura utilizada:

Operación	Vectores	Vectores circulares	Listas enlazadas
queue	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
push	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
front	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
pop	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
empty	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
size	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$

5.3. Implementación de colas con una lista enlazada y nodo fantasma

Para evitar los casos especiales que teníamos antes en los que había que tener en cuenta que la cola podía estar o no vacía se puede utilizar un *nodo fantasma*: un nodo extra al principio de la lista enlazada que hace de *cabecera* especial que siempre tenemos, que no guarda ningún elemento, pero nos permite no tener que distinguir el caso en el que `_prim` es `nullptr` (cola vacía). La complejidad de las operaciones no varía, pero su programación es más sencilla; puedes comprobarlo realizando la implementación. La misma técnica la utilizaremos a continuación para las colas dobles.

6. Colas dobles

Las colas dobles son una generalización de las colas en donde se pueden añadir, quitar y consultar elementos en los dos extremos. En concreto las operaciones serán:

- `Constructora`: Genera una cola doble vacía.
- `push_back`: Añade un nuevo elemento al final.
- `push_front`: Añade un nuevo elemento al principio.
- `pop_front`: Modificadora parcial que elimina el primer elemento de la cola. Lanza excepción si la cola está vacía.
- `pop_back`: Modificadora parcial que elimina el último elemento de la cola. Lanza excepción si la cola está vacía.
- `front`: Observadora parcial que devuelve el primer elemento de la cola. Lanza excepción si la cola está vacía.
- `back`: Observadora parcial que devuelve el último elemento de la cola. Lanza excepción si la cola está vacía.
- `empty`: Observadora que permite averiguar si la cola tiene elementos.
- `size`: Observadora que devuelve el número de elementos de la cola.

Dada su semejanza con las colas de la sección anterior existen opciones similares para la implementación, aunque en el caso de la implementación utilizando nodos, es preferible el uso de listas doblemente enlazadas frente a las simples.

No obstante las implementaciones requieren el doble de cuidado que las del TAD hermano de las colas, pues necesitamos cubrir más casos especiales. Es por eso que la opción de implementación con una lista enlazada circular y nodo fantasma aparece como la mejor candidata.

En concreto la cola vacía estará representada por un nodo fantasma que no contiene ningún elemento y cuyos punteros anterior y siguiente apuntan a él mismo. Ese nodo fantasma, que se crea al principio y no se borrará hasta el final, es apuntado por el único atributo de la clase. La implementación hará que *el siguiente* al nodo fantasma sea el primero de la cola (la cabecera), mientras que el *anterior* será el último.

La relación de equivalencia no es muy diferente de la vista para las pilas y colas; el único cambio es la condición que marca el final de la recursión en el predicado *iguales* que utilizábamos entonces. Ahora no debemos terminar cuando se llega al *null*, sino cuando volvemos al nodo de partida. Para eso extendemos los parámetros de *iguales* para que además de tener los nodos de partida tenga también como parámetros los nodos donde la recursión debe terminar.

$$\begin{aligned}
 c1 &\equiv_{Deque_T} c2 \\
 \iff_{def} & \\
 &iguales_T(\\
 &\quad c1.fantasma.sig, c1.fantasma.fin, \\
 &\quad c2.fantasma.sig, c2.fantasma.fin \\
 &\quad)
 \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned}
 iguales(i1, e1, i2, e2) &= \text{true} & \mathbf{si} \quad i1 = e1 \wedge i2 = e2 \\
 iguales(i1, e1, i2, e2) &= \text{false} & \mathbf{si} \quad (i1 = e1 \wedge i2 \neq e2) \vee \\
 & & \quad (i1 \neq e1 \wedge i2 = e2) \\
 iguales(i1, e1, i2, e2) &= i1.elem \equiv_T i2.elem \wedge & \mathbf{si} \quad (i1 \neq e1 \wedge i2 \neq e2) \\
 &\quad iguales(i1.sig, e1, i2.sig, e2)
 \end{aligned}$$

Por su parte el invariante de la representación tiene que incorporar también la circularidad de la lista. Para la definición del invariante utilizamos un conjunto similar al *cadena* utilizado en las pilas pero que indica qué elementos son alcanzables desde un nodo dado si seguimos su puntero *sig* por un lado y *ant* por otro. Es claro que:

- El conjunto de nodos alcanzables desde el nodo cabecera por un lado y por otro debe ser el mismo.
- Dado que la lista es circular, el nodo cabecera debe aparecer en el conjunto de nodos alcanzables a partir de él.
- Todos esos nodos deben estar ubicados y tener los enlaces al nodo anterior y al nodo siguiente correctos (lo que implica que si vamos al nodo anterior de *n* y luego pasamos a su siguiente deberíamos volver a *n* y al contrario).
- Por último, todos los nodos (excepto el nodo cabecera) deben contener elementos válidos del tipo base.

Con esta idea, el invariante de la representación queda (por comodidad en las definiciones siguientes se entenderá *ini* como *c.fantasma*):

$$\begin{aligned}
& R_{Deque_T}(c) \\
& \iff_{def} \\
& \quad alcanzables(ini) = alcanzablesHaciaAtras(ini) \wedge \\
& \quad ini \in alcanzables(ini) \wedge \\
& \quad \forall p \in alcanzables(ini) : \\
& \quad \quad (\\
& \quad \quad \quad ubicado(p) \wedge buenEnlace(p) \wedge \\
& \quad \quad \quad (p \neq ini \rightarrow R_T(p.elem)) \\
& \quad \quad)
\end{aligned}$$

Donde, como hemos dicho antes, *alcanzables* es el conjunto de todos los nodos que pueden alcanzarse desde un nodo dado utilizando el puntero *sig* y *alcanzablesHaciaAtras* utilizando *ant*. Por último, *buenEnlace* indica si los punteros son correctos desde el punto de vista de una lista doblemente enlazada:

$$\begin{aligned}
alcanzables(p) &= \emptyset & \text{si } p = \text{null} \\
alcanzables(p) &= \{p.sig\} \cup alcanzables(p.sig) & \text{si } p \neq \text{null}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
alcanzablesHaciaAtras(p) &= \emptyset & \text{si } p = \text{null} \\
alcanzablesHaciaAtras(p) &= \{p.ant\} \cup alcanzablesHaciaAtras(p.ant) & \text{si } p \neq \text{null}
\end{aligned}$$

$$buenEnlace(p) = p.sig.ant = p \wedge p.ant.sig = p$$

Observa que la implementación crea en el momento de su construcción el nodo “fantasma” y que en la destrucción se rompe la circularidad de la lista para poder utilizar `libera` sin riesgo a entrar en bucles infinitos. Por otro lado verás que la implementación de las operaciones no tienen que preocuparse de casos especiales (más allá de las precondiciones de `esVacia`), haciendo la implementación casi trivial:

```

template <class T>
class deque {
protected:

    // puntero al nodo fantasma
    Nodo* fantasma;

    // número de elementos
    int nelems;

public:

    // constructor: cola doble vacía
    deque() : fantasma(new Nodo()), nelems(0) {
        fantasma->sig = fantasma->ant = fantasma; // circular
    }

    // destructor

```

```

~deque() {
    libera();
}

// añadir un elemento por el principio
void push_front(T const& e) {
    inserta_elem(e, fantasma, fantasma->sig);
}

// añadir un elemento por el final
void push_back(T const& e) {
    inserta_elem(e, fantasma->ant, fantasma);
}

// consultar el primer elemento de la dcola
T const& front() const {
    if (empty())
        throw std::domain_error("la dcola vacia no tiene primero");
    return fantasma->sig->elem;
}

// consultar el último elemento de la dcola
T const& back() const {
    if (empty())
        throw std::domain_error("la dcola vacia no tiene ultimo");
    return fantasma->ant->elem;
}

// eliminar el primer elemento
void pop_front() {
    if (empty())
        throw std::domain_error("eliminando el primero de una dcola vacia");
    borra_elem(fantasma->sig);
}

// eliminar el último elemento
void pop_back() {
    if (empty())
        throw std::domain_error("eliminando el ultimo de una dcola vacia");
    borra_elem(fantasma->ant);
}

// consultar si la dcola está vacía
bool empty() const {
    return nelems == 0;
}

// consultar el tamaño de la cola doble
int size() const {
    return nelems;
}

protected:

    // insertar un nuevo nodo entre anterior y siguiente
    Nodo* inserta_elem(T const& e, Nodo* anterior, Nodo* siguiente) {

```

```

    Nodo* nuevo = new Nodo(e, anterior, siguiente);
    anterior->sig = nuevo;
    siguiente->ant = nuevo;
    ++nelems;
    return nuevo;
}

// eliminar el nodo n
void borra_elem(Nodo* n) {
    assert(n != nullptr);
    n->ant->sig = n->sig;
    n->sig->ant = n->ant;
    delete n;
    --nelems;
}
};

```

La complejidad de las operaciones en esta implementación es:

Operación	Listas enlazadas
deque	$\mathcal{O}(1)$
push_back	$\mathcal{O}(1)$
front	$\mathcal{O}(1)$
pop_front	$\mathcal{O}(1)$
push_front	$\mathcal{O}(1)$
back	$\mathcal{O}(1)$
pop_back	$\mathcal{O}(1)$
empty	$\mathcal{O}(1)$
size	$\mathcal{O}(1)$

7. Listas

Las listas son los TADs lineales más generales posibles⁷. Como las colas dobles, permiten la consulta, inserción y eliminación por los dos extremos, pero también permiten acceder a cualquier punto intermedio tanto para consultar como también para eliminar e insertar en él. Partiremos por tanto de la interfaz e implementación de las colas dobles mediante herencia:

```

template <class T>
class list : public deque<T> {
    ...
};

```

Obsérvese que dado que las listas son los TADs lineales más generales es posible desarrollar implementaciones del resto de TADs lineales basándose directamente en las listas. Ver el ejercicio 16.

⁷No confundir el TAD *lista* con la estructura de datos *lista enlazada*; las listas enlazadas deben verse como un método de organizar en memoria una colección de elementos; el TAD *lista* es un tipo abstracto de datos con una serie de operaciones que puede implementarse utilizando listas enlazadas pero también otro tipo de estructuras de datos, como los vectores dinámicos.

Para poder acceder a puntos intermedios de la lista una primera idea consistiría en proporcionar la operación `at` (análoga a la operación del mismo nombre en el TAD `vector`) que nos devuelva una referencia al elemento en la posición i -ésima de la lista.

```

/**
Devuelve el elemento  $i$ -ésimo de la lista, teniendo en cuenta que
el primer elemento (first()) es el elemento 0 y el último es
size()-1, es decir idx está en  $[0..size()-1]$ . Operación parcial que
puede fallar si se da un índice incorrecto. El índice es entero sin
signo, para evitar que se puedan pedir elementos negativos.
*/
T& at(unsigned int idx) const {
    if (idx >= nElems)
        throw std::out_of_range("Indice no valido");
    Nodo* aux = prim;
    for (int i = 0; i < idx; ++i)
        aux = aux->sig;
    return aux->elem;
}

```

Sin embargo un uso descuidado de esta operación podría llevar a situaciones no deseadas en cuanto a ineficiencia. Por ejemplo, la complejidad de un bucle tan inocente como el siguiente:

```

list<int> l;

...

for (int i = 0; i < l.size(); ++i)
    std::cout << l.at(i) << " ";

```

que simplemente escribe uno a uno todos los elementos *no* tiene coste lineal sino cuadrático! Por esta razón algunas implementaciones reales de las listas (como es el caso de la clase `list` de la STL de C++) de hecho no incluyen esta operación.

7.1. Iteradores

La solución adoptada de manera estandarizada para recorrer estructuras de datos y también para acceder a (e insertar y eliminar en) puntos intermedios son los *iteradores*. Entenderemos un iterador como un objeto de una clase que:

- Representa un punto intermedio en el recorrido de una colección de datos (una lista en este caso).
- Tiene un método que devuelve el elemento por el que va el recorrido (y tendrá el tipo base utilizado en la colección). La operación será *parcial*, pues fallará si el recorrido ya ha terminado. En C++ este método se implementa mediante el operador `*` por su analogía con lo que sería acceder al contenido de una variable de tipo puntero.
- Tiene un método que hace que el iterador pase al siguiente elemento del recorrido. En C++ lo estándar es sobrecargar el operador `++`.
- Tiene implementada la operación de comparación, de forma que se puede saber si dos iteradores son iguales. Dos iteradores son iguales si: representan el mismo punto en el recorrido de una lista concreta o los dos representan el final del recorrido.

Extenderemos el TAD `list` para que proporcione dos operaciones adicionales:

- `begin()`: devuelve un iterador inicializado al primer elemento del recorrido⁸
- `end()`: devuelve un iterador apuntando *fuera* del recorrido, es decir un iterador cuya operación ** falla*.

Haciendo que la operación `end()` devuelva un iterador *no válido* implica que los elementos válidos de la lista son el *intervalo abierto* `[begin(), end())`, y la forma de recorrer una lista sería por tanto (en este caso simplemente para imprimir cada elemento):

```
list<int> l;

...

for (list<int>::iterator it = l.begin(); it != l.end(); ++it) {
    cout << *it << endl;
}
```

Desde el estándar *C++11* este tipo de recorridos también puede escribirse mediante un bucle de tipo *range-based for* de esta forma:

```
list<int> l;

...

for (int e : l) {
    cout << e << endl;
}
```

Este tipo de bucle puede interpretarse como “para cada elemento *e* en el recorrido usando el iterador de la estructura *l*”. Aunque esta forma es más cómoda es también menos expresiva que la forma anterior usando explícitamente objetos iteradores.

7.2. Implementación de un iterador básico

La implementación se basa en la existencia de la clase interna y protegida `Iterador` la cual es instanciada correspondientemente para los iteradores constantes y no-constantes en los tipos públicos `const_iterator` e `iterator` respectivamente. Como podemos observar tiene como atributos un puntero al nodo actual en el recorrido (`act`) y otro al nodo fantasma `fan`, para poder saber cuándo estamos fuera del recorrido.

```
template <class T>
class list : public deque<T> {
protected:
    using Nodo = typename deque<T>::Nodo;

    template <class Apuntado>
    class Iterador {
        // puntero al nodo actual del recorrido
        Nodo* act;
        // puntero al nodo fantasma (para saber cuándo estamos fuera)
```

⁸También incluiremos una versión constante llamada `cbegin`, que se utilizará en casos en los que queramos (o necesitemos) indicar que el iterador no permite hacer modificaciones sobre la lista durante el recorrido.

```

    Nodo* fan;

public:
    Iterador() : act(nullptr), fan(nullptr) {}

    // para acceder al elemento apuntado
    Apuntado& operator*() const {
        if (act == fan) throw std::out_of_range("fuera de la lista");
        return act->elem;
    }

    Iterador& operator++() { // ++ prefijo (recomendado)
        if (act == fan) throw std::out_of_range("fuera de la lista");
        act = act->sig;
        return *this;
    }

    bool operator==(Iterador const& that) const {
        return act == that.act && fan == that.fan;
    }

    bool operator!=(Iterador const& that) const {
        return !(*this == that);
    }

private:
    // para que list pueda construir objetos del tipo iterador
    friend class list;

    // constructora privada
    Iterador(Nodo* ac, Nodo* fa) : act(ac), fan(fa) {}
}; // Fin de la clase interna Iterador

public: // de la clase list
    /*
     * Iteradores que permiten recorrer la lista pero no cambiar sus elementos.
     */
    using const_iterator = Iterador<T const>;

    // devuelven un iterador constante al principio de la lista
    const_iterator cbegin() const {
        return const_iterator(this->fantasma->sig, this->fantasma);
    }

    // devuelven un iterador constante al final del recorrido y fuera de este
    const_iterator cend() const {
        return const_iterator(this->fantasma, this->fantasma);
    }

    /*
     * Iteradores que permiten recorrer la lista y cambiar sus elementos.
     */
    using iterator = Iterador<T>;

    // devuelve un iterador al principio de la lista

```

```

iterator begin() {
    return iterator(this->fantasma->sig, this->fantasma);
}

// devuelve un iterador al final del recorrido y fuera de este
iterator end() {
    return iterator(this->fantasma, this->fantasma);
}
};

```

Obsérvese que mediante un iterador no-constante podemos hacer recorridos que vayan alterando la lista. Por ejemplo, la siguiente función incrementa cada elemento de una lista de enteros.

```

list<int> l;
...
for (list<int>::iterator it = l.begin(); it != l.end(); ++it) {
    (*it)++;
}

```

Usando un bucle de tipo *range-based-for* quedaría de esta forma:

```

for (int& e : l) e++;

```

En este caso es necesario el & para indicar que cada elemento del recorrido se debe capturar en la variable *e* por referencia.

7.3. Usando iteradores para insertar elementos

El TAD `list` puede extenderse para permitir insertar elementos en medio de la lista. Para eso se puede utilizar el mecanismo de iteradores: la operación recibirá un iterador situado en el punto de la lista donde se desea insertar un elemento y el elemento a insertar. En concreto, el elemento lo añadiremos *a la izquierda* del punto marcado. Eso significa que si insertamos un elemento a partir de un iterador colocado al principio del recorrido, el nuevo elemento añadido pasará a ser el primero de la lista y el iterador apunta al segundo. Si el iterador está al final del recorrido (en `end()`), el elemento insertado será el nuevo último elemento de la lista, y el iterador sigue apuntando al `end()`, es decir por el hecho de insertar, la posición del iterador no cambia.

Por ejemplo, la siguiente función duplica todos los elementos de la lista, de forma que si el contenido inicial era por ejemplo `[1, 3, 4]` al final será `[1, 1, 3, 3, 4, 4]`:

```

void repiteElementos(list<int>& lista) {

    list<int>::iterator it = lista.begin();
    while (it != lista.end()) {
        lista.insert(it, *it);
        ++it;
    }
}

```

La implementación de la operación `insert` de la lista, por tanto, recibe el iterador que marca el lugar de la inserción y el elemento a insertar.

```

// Inserta un elemento delante del apuntado por el iterador it
// (it puede estar apuntado detrás del último)

```

```
// devuelve un iterador al nuevo elemento
iterator insert(iterator const& it, T const& elem) {
    assert(fantasma == it.fan); // chequea que it es de esta lista
    Nodo* nuevo = this->inserta_elem(elem, it.act->ant, it.act);
    return iterator(nuevo, this->fantasma);
}
```

Nótese que, a parte de insertar el nuevo elemento, la operación devuelve un iterador apuntando al nuevo elemento, lo que puede resultar muy útil en ciertos contextos.

7.4. Usando iteradores para eliminar elementos

También se puede extender el TAD `list` para permitir borrar elementos internos a la lista. La operación recibe un iterador situado en el punto de la lista que se desea borrar. En esta ocasión, dado que ese elemento dejará de existir ese iterador recibido *deja de ser válido*. Para poder seguir recorriendo la lista la operación devuelve un nuevo iterador que deberá utilizarse desde ese momento para continuar el recorrido.

Por ejemplo, la siguiente función elimina todos los elementos pares de una lista de enteros:

```
void quitaPares(list<int>& l) {
    for (list<int>::iterator it = l.begin(); it != l.end(); ) {
        if ((*it) % 2 == 0)
            it = l.erase(it);
        else
            ++it;
    }
}
```

La implementación de la operación `erase` de la lista, por tanto, elimina el elemento y devuelve un iterador apuntando al *siguiente* elemento (o devuelve el iterador que marca el fin del recorrido si no quedan más).

```
// elimina el elemento apuntado por el iterador (debe haber uno)
// devuelve un iterador al siguiente elemento al borrado
iterator erase(iterator const& it) {
    assert(this->fantasma == it.fan); // comprueba que it es de esta lista
    if (it.act == this->fantasma)
        throw std::out_of_range("fuera de la lista");
    iterator next(it.act->sig, this->fantasma);
    this->borra_elem(it.act);
    return next;
}
```

7.5. Peligros de los iteradores

El uso de iteradores conlleva un riesgo debido a la existencia de *efectos laterales* en las operaciones. Al fin y al cabo un iterador abre la puerta a acceder a los elementos de la lista *desde fuera* de la propia lista. Eso significa que los cambios que ocurran en ella afectan al resultado de las operaciones del propio iterador. Por ejemplo el código siguiente fallará:

```
list<int> lista;
lista.push_front(3);
list<int>::iterator it = lista.begin();
```

```
lista.pop_front(); // Quitamos el primer elemento
cout << *it << endl; // Accedemos a él... CRASH
```

Cuando el iterador permite cambiar el valor y, sobre todo, cuando se pueden borrar elementos utilizando iteradores las posibilidades de provocar funcionamientos incorrectos crecen.

No obstante, las ventajas de los iteradores al permitir recorridos eficientes (y generales, ver ejercicio 28) superan las desventajas. Pero el programador deberá estar atento a los iteradores y ser consciente de que las operaciones de modificación del TAD que está siendo recorrido pueden invalidar sus iteradores.

7.6. En el mundo real...

Como hemos dicho antes, a pesar de los posibles problemas de los iteradores, son muy utilizados (en distintas modalidades) en los lenguajes mayoritarios, como C++, Java o C#. La ventaja de los iteradores es que permiten abstraer el TAD que se recorre y se pueden tener algoritmos genéricos que funcionan bien independientemente de la colección utilizada. Por ejemplo un algoritmo que sume todos los elementos dentro de un intervalo de una colección será algo así:

```
template <class iterador>
int sumaTodos(iterador it, iterador fin) {
    int ret = 0;

    while (it != fin) {
        ret += *it;
        ++it;
    }

    return ret;
}
```

donde el tipo de los parámetros “iterador” es un parámetro de la plantilla, para poder utilizarlo con cualquier iterador (que tenga los operadores * y ++) independientemente de la colección que se recorre.

Dada la liberalidad de C y C++ con los tipos y la identificación deliberada que hacen entre punteros, enteros y arrays (lo que se conoce como *dualidad puntero-array*), la sintaxis de iteración utilizada anteriormente permite recorrer incluso un vector sin la necesidad de declarar una clase iterador:

```
int v[100];
...
cout << sumaTodos(&v[0], &v[100]) << endl;

// Versión alternativa, utilizando la dualidad
// puntero-array y aritmética de punteros
// cout << sumaTodos(v, v + 100) << endl;
```

Por último, la librería de C++ además de distinguir entre los iteradores constantes y no constantes, permite abstraer *la dirección* del recorrido e incluso moverse en ambas direcciones.

8. Para terminar...

Terminamos el tema con la implementación de la función de codificación descrita en la primera sección de motivación. Como se ve, al hacer uso de los TADs ya implementados el código queda muy claro; nos podemos centrar en la implementación del algoritmo de codificación sin preocuparnos del manejo de vectores, índices, listas de nodos o estructuras de datos que se llenan y hay que redimensionar.

```
list<char> codifica(list<char>& mensaje) {

    // Primera fase; el resultado lo metemos
    // en una doble cola para facilitarnos
    // la segunda fase
    deque<char> resFase1;
    stack<char> aInvertir;
    list<char>::const_iterator it = mensaje.cbegin();

    while (it != mensaje.cend()) {
        char c = *it;
        ++it;

        // Si no es una vocal, metemos el caracter
        // en la pila para invertirlo posteriormente
        if (!esVocal(c))
            aInvertir.push(c);
        else {
            // Una vocal: damos la vuelta
            // a todas las consonantes que nos
            // hayamos ido encontrando
            while (!aInvertir.empty()) {
                resFase1.push_back(aInvertir.top());
                aInvertir.pop();
            }
            // Y ahora la vocal
            resFase1.push_back(c);
        }
    }

    // Volcamos las posibles consonantes que queden
    // por invertir
    while (!aInvertir.empty()) {
        resFase1.push_back(aInvertir.top());
        aInvertir.pop();
    }


    // Segunda fase de la codificación: seleccionar
    // el primero/último de forma alternativa.
    list<char> ret; // Mensaje devuelto
    while (!resFase1.empty()) {
        ret.push_back(resFase1.front());
        resFase1.pop_front();
        if (!resFase1.empty()) {
            ret.push_back(resFase1.back());
            resFase1.pop_back();
        }
    }
}
```


```
    return ret;
}
```

Notas bibliográficas



Gran parte de este capítulo se basa en el capítulo correspondiente de (Rodríguez Artalejo et al., 2011) y de (Peña, 2005). Es interesante ver las librerías de lenguajes como C++, Java o C#. Todas ellas tienen al menos una implementación de cada uno de los TADs lineales vistos en el tema e incluso más de una con distintas complejidades.

Ejercicios

Algunos de los ejercicios puedes probarlos en el portal y juez en línea “Acepta el reto” (<https://www.aceptaelreto.com>). Son los que aparecen marcados con el icono  seguido del número de problema dado en el portal.

1. (ACR140) Implementa, con ayuda de una pila, un procedimiento *no* recursivo que reciba como parámetro un número entero $n \geq 0$ y escriba por pantalla sus dígitos en orden lexicográfico y su suma. Por ejemplo, ante $n = 64323$ escribirá:

$6 + 4 + 3 + 2 + 3 = 18$

2. Implementa una función que reciba una pila y escriba todos sus elementos desde la base hasta la cima separados por espacios. Haz dos versiones, una versión recursiva y otra iterativa.
Haz una tercera versión, implementando la funcionalidad como parte de la clase `Stack`.
3. Completa las dos implementaciones de las pilas con una operación nueva, `size` que devuelva el número de elementos almacenados en ella. En ambos casos la complejidad debe ser $\mathcal{O}(1)$.
4. (ACR141) Implementa una función que reciba una secuencia de caracteres en una lista que contiene, entre otros símbolos, paréntesis, llaves y corchetes abiertos y cerrados y decida si está equilibrada. Entendemos por secuencia equilibrada respecto a los tres tipos de símbolos si cada uno de ellos tiene tantos abiertos como cerrados y si cada vez que aparece uno cerrado, el último que apareció fue su correspondiente abierto.
5. Dada una cadena que contiene únicamente los caracteres `<`, `>` y `.`, implementa una función que cuente cuántos *diamantes* podemos encontrar como mucho (`<>`), tras quitar toda la arena (`.`). Ten en cuenta que puede haber diamantes dentro de otros diamantes. Por ejemplo, en la cadena `<.<.>.><.><` hay tres diamantes.
6. (ACR252) Una frase se llama palíndroma si la sucesión de caracteres obtenida al recorrerla de izquierda a derecha (ignorando los espacios) es la misma que de derecha a izquierda. Esto sucede, por ejemplo, con la socorrida frase “*dábale arroz a la zorra el abad*” (ignorando la tilde de la primera palabra; podemos asumir que la

entrada no tendrá tildes y todo serán o bien letras o bien espacios). Construye una función *iterativa* ejecutable en tiempo lineal que decida si una frase dada como lista de caracteres es o no palíndroma. Puedes utilizar TADs auxiliares.

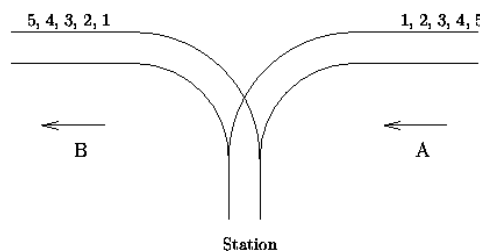
7. (🔗ACR143) Implementa una función que reciba una pila como parámetro de E/S y un número n e invierta los n valores almacenados en la pila, comenzando a contar desde la cima.
8. (🔗ACR198) Una expresión aritmética construída con los operadores binarios $+$, $-$, $*$ y $/$ y operandos (representados cada uno por un único caracter) se dice que está en forma *postfija* si es o bien un sólo operando o dos expresiones en forma postfija, una tras otra, seguidas inmediatamente de un operador. Lo que sigue es un ejemplo de una expresión escrita en notación infija habitual, junto con su forma postfija:

Forma infija: $(A / (B - C)) * (D + E)$

Forma postfija: $ABC-/DE+*$

Diseña un algoritmo iterativo que calcule el valor de una expresión dada en forma postfija (mediante una secuencia de caracteres) por el siguiente método: se inicializa una pila vacía de números y se van recorriendo de izquierda a derecha los caracteres de la expresión. Cada vez que se pasa por un operando, se apila su valor. Cada vez que se pasa por un operador, se desapilan los dos números más altos de la pila, se componen con el operador, y se apila el resultado. Al acabar el proceso, la pila contiene un solo número, que es el valor de la expresión.

9. (🔗ACR198) Repite el ejercicio anterior pero utilizando en lugar de una pila, una cola. Ante un operador se cogen los dos parámetros de la cabecera de la cola y se mete el resultado en la parte trasera de la misma.
10. Dicen las malas lenguas que el alcalde de Dehesapila recibió una buena tajada haciendo un chanchullo en la construcción de la estación de trenes. El resultado fue una estación con forma de “punto ciego” en la que únicamente hay una vía de entrada y una de salida. Para empeorar las cosas según la forma de la figura:



Todos los trenes llegan desde A y van hacia B , pero reordenando los vagones en un orden distinto. ¿Puedes ayudar a establecer si el tren que entra con los vagones numerados $1, 2, \dots, n$ puede reordenarse para que salga en un orden diferente enganchando y desenganchando vagones?

Por ejemplo, si entran los vagones $1, 2, 3, 4$ y 5 , se podrá sacarlos en el mismo orden (haciéndolos entrar y salir de uno en uno), en orden inverso (haciéndolos entrar a

todos y luego sacándolos), pero no se podrá conseguir que salgan en el orden 5, 4, 1, 2, 3.

Escribe una función que lea de la entrada estándar un entero que indica el número de vagones que entran (n) y luego vaya leyendo en qué orden se quiere que vayan saliendo de la estación (n enteros). La función escribirá `POSIBLE` si el jefe de estación puede ordenar los vagones e `IMPOSIBLE` si no⁹.

11. Extiende la función del ejercicio anterior para que en vez de indicar si es posible o no reordenar los vagones como se desea, escriba los movimientos que debe hacer el jefe de estación (meter un vagón en la estación / sacar un vagón de la estación).
12. Realiza una implementación de las colas utilizando vectores (dinámicos) de forma que la complejidad de todas las operaciones sea $\mathcal{O}(1)$. Para eso, en vez de utilizar un único atributo que indica cuántos elementos hay en el vector, utiliza dos atributos que permitan especificar el intervalo de elementos del vector que se están utilizando. Esta implementación se conoce con el nombre de *implementación mediante vectores circulares*.
13. Realiza una implementación con lista enlazada y nodo fantasma de las colas.
14. Completa la implementación de las colas con lista enlazada de nodos con una nueva operación `numElems` cuya complejidad sea $\mathcal{O}(1)$.
15. Extiende la implementación del TAD lista con una nueva operación `concatena` que reciba otra lista y añada sus elementos a la lista original. Por ejemplo, si `xs = [3, 4, 5]` y concatenamos `ys = [5, 6, 7]` con `xs.concatena(ys)`, al final tendremos que `xs` será `[3, 4, 5, 5, 6, 7]`. ¿Qué complejidad tiene la operación? ¿Podríamos conseguir complejidad $\mathcal{O}(1)$ de alguna forma?
16. Implementa los TADs de las pilas, colas y colas dobles utilizando la implementación del TAD lista, de forma que las nuevas implementaciones tengan como único atributo una lista.
17. Dados dos números con un número de dígitos indeterminado expresados en una lista de enteros, donde el primer elemento de cada lista es el dígito más significativo (dígito izquierdo) de cada número, implementa una función que devuelva una lista con la suma de ambos números.
18. (🐞ACR142) El profesor de EDA ha decidido sacar a un alumno a hacer un examen sorpresa. Para seleccionar al “afortunado” ha numerado a cada uno de los n alumnos con un número del 1 al n y los ha colocado a todos en círculo. Empezando por el número 1, va “salvando” a uno de cada dos (es decir, “salva” al 2, luego al 4, luego al 6, etc.), teniendo en cuenta que al ser circular, cuando llega al final sigue por los que quedan sin salvar. ¿Qué número tendrá el alumno “afortunado”?

Implementa una función:

```
int selecciona(int n);
```

⁹Este ejercicio es una traducción casi directa de http://uva.onlinejudge.org/index.php?option=onlinejudge&page=show_problem&problem=455; la imagen del enunciado es una copia directa.

que devuelva el número de alumno seleccionado si tenemos n alumnos.

Generaliza la función anterior para el caso en el que el profesor salve a uno de cada m en lugar de a uno de cada 2.

19. (🔗ACR146) Dado un número natural $N \geq 2$, se llaman números afortunados a los que resultan de ejecutar el siguiente proceso: se comienza generando una cola que contiene los números desde 1 hasta N en este orden; se elimina de la cola un número de cada 2 (es decir, los números 1, 3, 5, etc.¹⁰); de la nueva cola, se elimina ahora un número de cada 3; etc. El proceso termina cuando se va a eliminar un número de cada m y el tamaño de la cola es menor que m . Los números que queden en la cola en este momentos son los afortunados.

Diseña un procedimiento que reciba N como parámetro y produzca una lista formada por los números afortunados resultantes.

(Indicación: para eliminar de una cola de n números un número de cada m puede reiterarse n veces el siguiente proceso: extraer el primer número de la cola, y añadirlo al final de la misma, salvo si le tocaba ser eliminado.)

20. Dada una lista de números, se repite el siguiente proceso hasta que queda únicamente uno: se elimina el primer elemento de la lista, y se pone el segundo al final. Implementa una función que, dada la lista, escriba el último número superviviente.
21. (🔗ACR197) Implementa la función de *decodificación* de un mensaje según el algoritmo descrito en la primera sección del tema.
22. (🔗ACR144) ¿Cuál será el texto final resultado de la siguiente pulsación de teclas, y dónde quedará el cursor colocado? d, D, <Inicio>, <Supr>, <FlechaDcha>, A, <Inicio>, E, <Fin>

Haz una función que reciba una lista con las pulsaciones de teclas y devuelva una lista con el texto resultante.

23. (🔗ACR258) Implementa una función que reciba un vector de enteros de tamaño N y un número K , y escriba el valor mínimo de cada subvector de tamaño K en $\mathcal{O}(N)$.
Por ejemplo, para el vector $[1, 3, 2, 5, 8, 5]$ y $k = 3$, debe escribir $[1, 2, 2, 5]$.

Recorridos

24. Implementa una función que reciba una lista e imprima todos sus elementos. La complejidad de la operación debe ser $\mathcal{O}(n)$ incluso para la implementación del TAD lista utilizando listas enlazadas.
25. Implementa utilizando iteradores una función que reciba una secuencia de caracteres y devuelva el número de “a” que tiene.
26. Dada una secuencia de enteros, contar cuántas posiciones hay en ella tales que el entero que aparece en esa posición es igual a la suma de todos los precedentes.
27. Implementa una función que reciba dos listas de enteros ordenados y devuelva una nueva lista ordenada con la unión de los enteros de las dos listas.

¹⁰Observa que este tipo de eliminación es distinto al del ejercicio 18.

28. Extiende el TAD lista implementando dos operaciones nuevas `reverse_begin` y `reverse_end` que devuelva sendos `ReverseIterator` que permitan recorrer la lista desde el final al principio.
29. Utilizando el iterador del ejercicio anterior junto con el iterador de las listas, implementa una función que reciba un `list` y mire si la lista es palíndroma o no. Recuerda: *no* está permitido usar una pila (ese es el ejercicio 6).
30. Implementa una función que reciba una lista de enteros y duplique (multiplique por dos) todos sus elementos. Haz uso de los iteradores.

31. Implementa:

- Una función que busque un elemento en un `list<T>` y devuelva un iterador mutable al primer elemento encontrado (o a `end()` si no hay ninguno).
- Mejora la función anterior para que, en vez de recibir la lista, reciba dos iteradores que marcan el intervalo (abierto) sobre el que hay que buscar el elemento, de forma que la función anterior pueda implementarse como:

```
template <class T>
list<T>::iterator busca(const T& elem, list<T>& l) {
    return busca(elem, l.begin(), l.end());
}
```

- Implementa una función parecida a la anterior pero que en vez de buscar un elemento *lo borre*. En concreto, borrará todos los elementos que aparezcan en el intervalo (no solamente el primero).
- Utilizando las funciones anteriores, implementa una función que reciba una lista de caracteres y elimine todas las “a” de la primera palabra.