Estructuras de datos con Golang moderno

Isaac Julián Nieto Gallegos

January 14, 2026

Contents

1 Introducción

1.1 El arte de la ciencia y la ciencia del arte

En estos momentos que estoy escribiendo la introducción, soy un estudiante de Quinto Semestre de Ciencias de la Computación en la UNAM. Han pasado unos cuantos semestres desde que tomé el curso de Estructuras de Datos en la facultad, un curso que consideré clave en su momento para formar todos los conocimientos esenciales que iba a necesitar el resto de la carrera: es un curso denso que utilizando como recipiente lo que conocemos como estructuras de datos te presenta de manera discreta pero notoria -como la brisa de aire que sientes al llegar por primera vez a un lugar extranjero que no conocías- varios conocimientos y sutilezas que espero seguir utilizando el resto de mi vida como profesional: los algoritmos.

He visto en mi corta vida como computólogo como solemos pasar por alto el enfoque algorítmico de la profesión, sin darnos cuenta de que el análisis de algoritmos es lo que crea la parte artística de la computación. Y en los momentos en los que estoy escribiendo esto, justamente me estaba pasando esto.

Uno se deja absorber por las tecnologías que nos ofrece la computación moderna: frameworks que te permiten construir proyectos completos en cuestión de horas; metodologías "ágiles" que convierten el proceso de desarrollo de software en una cadena de comida rápida, donde se valora solamente la relación entre lineas de código escritas, tiempo invertido, y progresos logrados; agentes de IA que convierten el proceso de programación en una conversación con un ente todopoderoso que, bien aplicado, puede ser el equivalente a un equipo completo de becarios altamente entusiastas pero también tontos. Y en general, tecnologías que nos sirven para trabajar, pues evidentemente, en un mundo con un paso tan raudo y brutal como el nuestro, sería de tonto no rendirse a la producción en serie cuando el taller necesita competir con otras fábricas; pero que no poseen artesanalidad en su uso. La parte artística de la computación es muy fácil de ser olvidada, y justo eso es lo que me estaba pasando a mí: había dejado que el ritmo frenético de los proyectos universitarios y las herramientas "mágicas" opacaran el placer de entender, desde cero, cómo las estructuras de datos dan forma a los algoritmos con elegancia y precisión.

1.2 Mi viaje ritual

Para contrarrestar esto, comienzo este proyecto, en el cual voy a revisitar la materia que tanto me agradó en sus inicios. Al puro estilo de uno de

los computólogos que más admiro, porque supo dar claramente con la parte artística de la computación y supo quedarse con ella: Donald Knuth. Knuth, con su monumental The Art of Computer Programming, no solo documentó algoritmos; los elevó a la categoría de literatura técnica, donde cada línea de código es parte de una narrativa mayor. Inspirado en esa filosofía, este documento adopta el enfoque de la programación literaria (literate programming), una técnica que él mismo pionerizó. Aquí, el código en Go no es un apéndice seco, sino un hilo tejido en el relato: explicaciones detalladas, decisiones de diseño y ejemplos ejecutables se entrelazan en un solo tejido narrativo, usando Org-mode como lienzo. Este no es un mero porting de estructuras de datos de otro lenguaje —aunque se inspira en el libro Estructuras de Datos con Java Moderno de Canek Peláez Valdez, reinterpretando sus conceptos para las idiosincrasias de Go: su simplicidad, concurrencia nativa y énfasis en la eficiencia idiomática—. Es un ritual personal de redescubrimiento. A lo largo de estas páginas, exploraremos desde lo básico (listas enlazadas, pilas, colas) hasta lo más sofisticado (árboles AVL, heaps binarios, grafos y hasta estructuras avanzadas como árboles de Fenwick y Segment Trees, que agrego por curiosidad propia). Cada sección no solo implementará el código, sino que reflexionará sobre por qué Go lo hace de manera única: ¿cómo la garbage collection de Go simplifica la gestión de memoria en árboles balanceados? ¿O cómo los canales y goroutines pueden potenciar grafos en entornos concurrentes? El objetivo es doble: para mí, es un ejercicio de artesanía computacional que me reconecta con las raíces algorítmicas de la disciplina; para ti, lector, espero que sea una guía clara y motivadora para dominar estructuras de datos en Go moderno, recordándonos que, en medio del caos tecnológico, siempre hay espacio para el arte de programar con intención y belleza.

1.3 Como leer este trabajo?

Este trabajo está escrito en org-mode con el paradigma de la programación letrada, y como tal, puede ser leído de varias maneras:

La primera y la más fácil es en su forma de libro, la cual probablemente exista dentro de este repositorio. De esta forma , puedes leerlo como si directamente fuera un libro, con sus bloques de código como ejemplos del concepto de turno del que estemos hablando en ese momento. Esta forma definitivamente es la más rápida y directa de leer este trabajo.

Por otro lado, la mejor forma pero puede que la más díficil es la forma en la que también fue escrito: en un entorno Emacs adecuadamente configurado para tanglear y weavear este documento, lo cual convertirá este trabajo en

una pieza de lectura con bloques de código interactivos y ejecutables, al puro estilo de un Jupyter Notebook (plataforma interactiva que por cierto también nace como una forma de Programación Letrada), y además, en una pieza que generará todo el código fuente necesario para que estas estructuras de datos cobren vida como una librería con la que puedes trabajar y divertirte como si fuera una pieza de código tradicional.

1.4 Ok, pero cómo logro esta última forma?

Sección pendiente jajaj

2 Genéricos

Muchas de las estructuras de datos que se van a revisar en este trabajo son **colecciones**, es decir, agrupaciones de elementos que permiten repeticiones (por lo que no son conjuntos).

Y nos interesa poder realizar estas operaciones de "guardar" y "retirar" elementos de este conjunto de una manera repetible y que nos garantice que funcionará sin importar el **tipo** de los elementos que guardaremos en el conjunto. Para dejar clara esta necesidad, coloquémonos en esta situación:

2.1 El mundo sin genéricos

Estamos desarrollando una pequeña aplicación para calcular distintos tipos de máximos. En particular vamos a pensar en dos tipos de máximos: el máximo entre dos números, y el máximo entre dos cadenas de texto.

Primero que nada, como que máximo entre dos cadenas de texto? Las cadenas de texto no poseen una "relación de orden" directamente notable que podamos usar, así que primero debemos de eliminar este nivel de ambigüedad. Diremos que pensamos en el orden lexicográfico, es decir, el orden alfabético que usamos para guardar los libros en una bibilioteca según su título.

Comenzaremos a implementar la primera, para quitarnos trabajo trivial de encima lo más rápido posible.

```
import "fmt"

func intMax(a int, b int) int {
 if a > b{
  return a
```

```
 }

 return b
}
```

Y de paso creamos una pequeña prueba para ver que funciona correctamente.

```
func main() {
 fmt.Println("El maximo entre 15 y 20 es: ", intMax(15,20))
}
```

Para comprobar que todo funciona, veremos que si corremos el archivo, nuestra función trabaja bien.

```
go run miscs/intMax/intMax.go
```

Ahora, procedamos a hacer la otra función que nos falta.

Mi primer approach, y probablemente el que estés pensando tú también al leer este texto, sería implementar un orden lexicográfico a manita. Una cadena de pensamiento de la siguiente forma.

Como somos fans de las definiciones matemáticas, nos vamos a nuestra biblioteca (o libro digital) de confianza y comenzamos a buscar la definición formal de orden lexicográfico. Encontramos algo de este estilo:

Sean a, b cadenas vacías. Entonces un orden lexicográfico entre ellas se formaliza tal que:

$\forall [a_1...a_m], [b_1...b_n] \in \Sigma^* : [a_1...a_m] \leq [b1...bm] \iff a_1 < b_1 \vee (a_1 = b_1 \wedge [a_2...a_m] \leq [b_2...b_n])$

Inmediatamente observamos que esta definición se puede implementar de manera recursiva, pues tenemos los siguientes casos:

Caso Base: Una de las primeras letras de la cadena es menor a otra. Retornamos la cadena a la que pertenece la mayor y terminamos Paso recursivo: Las primeras letras de ambas cadenas son iguales, las retiramos y comparamos las que siguen

Para implementar esto de manera rápida lo haremos de manera recursiva, aunque está trivial hacerlo de manera iterativa.

```
package main
import "fmt"

func strMax(a string, b string) (string) {
```

```
 if a[0] > b[0] {
  return a
 }
 if a[0] < b[0] {
  return b
 }
 return strMax(a[1:], b[1:])
}
```

Probemos si funciona

```
func main() {
 fmt.Println("La mayor entre las cadenas Alberto y Enrique es: ", strMax("Alberto", "En
}
```

```
go run miscs/intMax/stMax.go
```

Existe, sin embargo, una forma más fácil. Y es que las strings en Golang implementan directamente la interfaz Ordered, y lo hacen con el orden lexicográfico, entonces en realidad podemos hacer solamente esto:

```
package main

import "fmt"

func strMax(a string, b string) (string) {
 if a > b {
  return a
 }
 return b
}

func main() {
 fmt.Println("La mayor entre las cadenas Alberto y Enrique es: ", strMax("Alberto", "En
}
```

Lo cual, si la memoria no nos falla (y no ocupamos memoria, retrocede en el texto un poco) es **exactamente** el mismo código que usaremos para

comparar en la función intMax. Se nos antojaría entonces poder usar una misma función para ambos casos y así no escribir doble (Do Not Repeat Yourself)

El obstáculo que tenemos es que en ambas firmas necesitamos especificar los tipos que una función va a recibir, y qué nos va a retornar. Veamos ambas firmas:

```
func intMax (a int, b int) (int) {...}
func strMax (a string, b string) (string) {...}
```

Las firmas de nuestras funciones le están pidiendo mucho a los tipos que reciben, una está pidiendo directamente que sean enteros, otra que sean strings. Se nos antojaría poder reciclar el mismo código para cualquier tipo que implemente la interfaz necesaria, que nuestra función sólo le pida eso a sus entradas.

De la misma forma, cuando comencemos a declarar nuestras estructuras de datos, pensemos por ejemplo en una Lista, nos encontraríamos con este problema análogo.

```
type ListInt struct {
 first *elementInt
 last *elementInt
 size int
}

type elementInt struct {
 value int
 prev *element
 next *element
}
```

Comenzamos a construir nuestra lista de enteros y nos encontraremos con el problema de que, bueno, sólo puede guardar enteros. Entonces, necesitaríamos construir también una lista de Strings, una lista de floats, una lista de MazdaMiata2005, y así por cada tipo que necesitemos, hasta el final de los tiempos.

Y como en realidad no estamos accediendo a ninguna propiedad especial de los tipos que guardamos, es decir, no vamos a guardar los enteros de una

manera distinta a la que guardamos las strings, pues todas estas estructuras en esencia serían la misma, solamente cambiando las declaraciones de sus elementos. Se nos antojaría que hubiera una mejor solución, no? Pues esos son los genéricos.

2.2 Un mundo con genéricos

Los genéricos son una característica que todo lenguaje de programación necesita. Su propósito principal es justamente permitir que las funciones, clases, y nuestras estructuras de datos, puedan funcionar con diferentes tipos de datos sin tener que reescribir el código para cada uno. En lugar de necesitar especificar un tipo de dato concreto y con eso pedirle mucho a nuestros códigos, podemos dejar estos "marcadores de posición" que generalizarán el tipo de dato. Este "marcador de posición" luego será manejado por nuestro compilador o intérprete para el tipo de dato que sea necesario durante la ejecución.

Los genéricos en Go existen desde la versión 1.18, y, al igual que en Java, se implementa en tiempo de compilación. Pero, contrario a Java, no se implementan usando borradura de tipos, se implementan usando monomorfización.

Lo que hace la monomorfización es crear una versión especializada del código genérico para cada tipo concreto que luego iba a usar este código genérico. Es decir, en esencia, el compilador de Go termina creando estas funciones especializadas por nosotros y las carga a nuestro binario por nosotros, haciéndolo de la siguiente manera:

1. Análisis: El compilador encunetra todas las invocaciones a código genérico

2. Generación de código: Por cada tipo concreto que se use (sea int, string, float64), el compilador va a generar una versión especializada del código genérico.

3. Sustitución: El compilador sustituye las llamadas al código genérico por llamadas al código especializado necesario que haya creado.

Este enfoque nos ofrece muchas ventajas y desventajas, como todo. La primera desventaja visible es que si el compilador está generando varias versiones especializadas de nuestro código genérico, eso evidentemente nos va a costar más peso en el binario final. Pero esa desventaja nos trae también la ventaja del rendimiento, pues, aunque el código es más amplio ahora, nos

ahorra hacer cualquier operación adicional en tiempo de ejecución, porque ya en los alambritos, el código que se llama en cada función es especializado y ya existente en el binario; es decir, todos los cálculos engorrosos respecto a los genéricos se hicieron en la compilación y ahí se quedaron.

Más aún, esta forma de implementación de los genéricos no tiene una forma de "tronar" como si la tiene la implementación por borradura de tipos de Java. Como el compilador se encarga por nosotros de realizar casi artesanalmente el código especializado que nos estamos ahorrando hacer nosotros, en esencia no estamos haciendo ningun compromiso por usar genéricos además del ya mencionado del tamaño del binario.

Pero qué pasaría si quisiéramos implementar genéricos en tiempo de ejecución en Golang como ya lo hacen lenguajes como Python? En general no habría mucho caso. Le estuve dando vueltas durante algo de tiempo a este asunto, y, fuera del compromiso que hacemos con el peso del binario (despreciable en hardware actual), la verdad es que esta implementación de Go está bastante bien alineada con lo que busca Go al ser un lenguaje compilado. Tal vez en lenguajes interpretados o en casos muy específicos podríamos añorar otra solución, pero en el caso general, la verdad es que esta implementación de genéricos es más que suficiente.

Con genéricos, nuestras dos funciones anteriores pasarían a ser una sola, tal que:

```
package main
import "fmt"
import "cmp"

func max[T cmp.Ordered] (a T, b T) (T) {
 if (a > b){
  return a
 }
 return b
}

func main() {
 fmt.Println("El maximo entre 15 y 20 es: ", max(15,20))
 fmt.Println("La mayor entre las cadenas Alberto y Enrique es: ", max("Alberto", "Enri

}
```

Lo único que agregamos nuevo es cmp.Ordered, la cual es la interfaz

que deben implementar los tipos ordenables de Golang, es decir, los que se puedan operar con "<,>, <=, >="

Los genéricos van a ser una herramienta con la que vamos a estar trabajando durante prácticamente todo este viaje, pues nos servirán para generalizar nuestras estructuras de datos, para poder guardar cualquier tipo en las mismas sin problemas.

3 Interludio: Preparando el entorno de trabajo

Antes de comenzar a ensuciarnos las manos construyendo esta biblioteca, debemos primero definirla para poder realizar una biblioteca utilizable por otros proyectos. Aunque dudo que realicemos un mejor trabajo que las implementaciones nativas (no por mucho, espero), creo que le daría una mayor formalidad a este trabajo el que pueda generar una biblioteca en condiciones, utilizable y todo.

El equivalente a Golang de las librerías son los módulos. Citando a la documentación de Golang:

> A module is a collection of packages that are released, versioned, and distributed together. Modules may be downloaded directly from version control repositories or from module proxy servers.
>
> A module is identified by a module path, which is declared in a go.mod file, together with information about the module's dependencies. The module root directory is the directory that contains the go.mod file. The main module is the module containing the directory where the go command is invoked.

Inicialmente, vamos a definir el módulo principal en donde vamos a estar agregando nuestros packages. Para esto, crearemos el archivo *go.mod* con el siguiente contenido:

```
module github.com/IsaacNietoG/goDataStructs

go 1.24.6
```

El nombre de un módulo en Go debe de darnos tanto la ruta para ser descargado como el nombre del mismo módulo en sí (y por extensión, lo que hace). De esta manera, los módulos en Go tienen esa virtud de que su mismo nombre también nos dice el lugar en donde lo podemos encontrar. Cosa que, si me preguntas, me parece algo bastante elegante y útil.

En el caso de este trabajo, lo podemos encontrar en mi repositorio de Github dedicado para este trabajo, dudo que en algún momento cambie esto, pero en ese caso tendríamos que realizar la modificación pertinente.

Como segunda línea, la versión para la que el módulo va a estar diseñado. Como en teoría no usaremos ningun módulo de terceros, no será necesario agregar un apartado de requires, ni cualquiera de los otros parámetros que puede contener este archivo. En dado caso que lo fuera, lo iremos tratando conforme avancemos.

4 Iteradores

Muchas de las estructuras de datos que vamos a implementar son **Iterables**. Que significa que son iterables?. El patrón de diseño Iterador nos dice que, si tenemos una estructura de datos que comprende varios elementos dentro de sí (sea colección, sea conjunto), esta misma estructura también nos debería de proporcionar una forma de recorrerla. Más formalmente:

> El patrón de diseño iterador provee una forma para acceder a los elementos de un objeto de manera secuencial, sin exponer su representación subyacente. Define un objeto separado llamado iterador, el cual nos permite iterar sobre el iterable.

Este patrón de diseño nace con el propósito de no exponer la implementación interna del iterable, mientras nos permite recorrerlo e ir realizando acciones diversas sobre sus elementos.

Vamos a definir las especificaciones que queremos que cumplan nuestros **Iterables** mediante una interfaz.

Primero que nada, la firma de esta interfaz ya debe de implementar genéricos, pues su implementación nos debe de retornar "elementos" de algún tipo que evidentemente no conocemos en este momento, pues los conoceremos cuando comencemos a utilizar el iterable.

Esta, al igual que el resto de las interfaces que vamos a utilizar durante este trabajo, van a vivir bajo el directorio */interfaces* de nuestro módulo. Y, de una vez vamos a declarar el tipo.

```
package interfaces

type Iterable[T any] interface{
 Iterator() Iterator[T any]
}
```

Lo único que nos interesa de la interfaz Iterable, por el momento, es que justamente nos proporcione la garantía de que nos va a proporcionar un Iterador

Ya de paso, me permito señalar una nota sobre el comportamiento de Golang respecto a la privacidad de sus tipos. En Golang, el nombre de una función/atributo/tipo determina la privacidad del mismo hacia el mundo exterior. Si el susodicho empieza por mayúscula, entonces es público, y como tal, va a ser visible fuera del módulo. De esta manera, las funciones/atributos/tipos auxiliares o privados que necesitemos utilizar se verán implícitamente iniciados por letra minúscula. Lo digo de una vez, porque mientras escribimos los nombres de esta nuestra primera interfaz puede nacer esa duda.

Luego, definiremos la interfaz del Iterator. Un iterador, por convención, implementa los siguientes métodos:

- hasNext: Nos dice si existen más elementos "después" del elemento actual en el que está ubicado. El orden en el que se recorre una estructura puede ser trivial mientras hablamos de estructuras triviales como Listas, pero definir cuándo es que un elemento existe "después" de otro es más complicado cuando avancemos a estructuras como árboles.

- next: Avanza hacia el siguiente elemento en su recorrido, no sin antes retornarnos una referencia al elemento que acaba de pasar.

Entonces, la interfaz para Iterator quedaría de la siguiente forma:

```
type Iterator[T any] interface{
 hasNext() bool
 next() T
}
```

4.1 Operador for-each

Otra razón por la que nos interesa implementar iteradores es porque de aquí también nace luego el operador for-each.

El operador for-each es uno que ya conocemos, pues tiene su presencia en varios lenguajes de programación. Pero el más inmediato es obviamente Python. Este es un ejemplo del operador siendo usado.

```
frutas = ["banana", "manzana", "mango", "pera"]

for x in frutas:
    print(x)
```

En el caso de Golang, se usa de la siguiente forma, usando como ejemplo un Slice como estructura a iterar.

```
arreglo := [3]string{"Apple", "Mango", "Banana"}

for index,element := range arreglo {
 fmt.Println(index)
 fmt.Println(element)
}
```

Esto se implementa en el fondo justamente como una suerte de "azucar sintáctica" que reemplaza un bucle en el que llamamos al iterador y mientras haya un siguiente elemento, realizamos un acción. Entonces, nos interesa que nuestros iterables también sean compatibles con esto.

Es aquí donde usar Go nos va a cambiar un poco el paradigma respecto a esto. Porque para hacer que nuestras estructuras sean compatibles con este operador, tenemos que implementarlas de una forma distinta a como lo habríamos hecho en otros lenguajes. Por eso, el boceto de interfaces que hasta el momento habíamos hecho, no será el final (*jajaj, te cuentié mijx*). Es más, si te vas al código fuente, ni siquiera aparece.

Antes de Go 1.23, esta funcionalidad se habría tenido que implementar de alguna manera relacionada probablemente a *canales*, pero tenemos la suerte y buena fortuna de que justamente en esta versión se implementó finalmente la biblioteca *iter*. Esta biblioteca nos proporciona la capacidad de que nuestros iteradores funcionen con el bucle nativo *for range* que vimos anteriormente.

4.2 Package iter

El paquete nos provee de definiciones básicas y operaciones con las que vamos a poder implementar iteradores sobre secuencias en nuestras estructuras de datos. El paquete define los siguientes tipos de iteradores:

```
type (
```

```
 Seq[V any]     func(yield func(V) bool)
 Seq2[K, V any] func(yield func(K, V) bool)
)
```

Ambos iteradores están definidos como funciones que le van pasando elementos a una función generadora llamada "yield". Esta función yield nos sirve como una suerte de hasNext(), que al igual que esta función, irá retornando true mientras haya más elementos que explorar, y false cuando llegue el momento de finalizar.

El iterador Seq devuelve un elemento, mientras que el iterador Seq2 regresa dos elementos a la vez. Pensaremos en utilizar Seq2 tal vez en diccionarios -para devolver llave y valor de un elemento a la vez- u otras estructuras en las que necesitemos que nuestra forma de iteración necesite devolver dos elementos a la vez.

De hecho, en el ejemplo de for-each de Go que vimos en páginas anteriores, el iterador que es utilizado es del tipo Seq2, pues al recorrer el slice, nos está regresando dos valores: el indice del elemento y el elemento en sí.

También debemos considerar que, para respetar las convenciones de nombrado de Golang, nuestros iteradores no van a ser devueltos por una función llamada Iterator, como habríamos hecho en otros lenguajes. En Golang, las funciones que retornarn iteradores llevan el nombre del segmento de la estructura que recorren. Por ejemplo, para definir un iterador que recorra por completo una estructura, lo declararíamos de la siguiente forma:

```
func (s *Set[V]) All() iter.Seq[V]
```

Vamos a profundizar más en los iteradores conforme vayamos realizando sus implementaciones para cada estructura de datos que realicemos, por lo mientras, nos quedamos con esto. Pero antes de irnos, vamos a crear por nuestra cuenta una interfaz Iterable para hacer más legibles las definiciones de nuestras estructuras. Esta interfaz nos va a obligar a implementar la función All, que, como su nombre bajo la convención nos dice, nos proporciona un iterador que va a recorrer la estructura completa.

```
package interfaces

import "iter"

type Iterable[V any] interface{
 All() iter.Seq[V]
}
```

5 Sobre la comparación de elementos en Golang

Muchos algoritmos esenciales de las estructuras de datos que vamos a ver en este texto requieren comparar elementos. Más específicamente, *asumen* que existe una forma de saber si dos elementos son *iguales o equivalentes*.

En Java, esto es sencillo de realizar porque se asume que todo objeto implementa su propio método equals, el cual da una pauta para decir que dos instancias de una clase son "iguales" de la siguiente forma:

```
Object objeto1 = new Object(...);
Object objeto2 = new Object(...);

bool sonEquivalentes =objeto1.equals(objeto2)
```

En Golang esto no es tan sencillo, porque no existe una pauta obligada para determinar si dos elementos son iguales. Para determinar esto se definen las siguientes reglas según el tipo de los elementos:

- Los tipos booleanos son comparables. Dos valores booleanos son iguales si ambos son *true* o ambos son *false*
- Los tipos enteros son comparables. Dos números son iguales si... bueno... son iguales
- Los tipos de punto flotante son comparables. Se define su regla de comparación según el estándar IEEE 754.
- Los tipos complejos son comparables. Dos valores complejos son iguales si sus componentes reales e imaginarios son iguales.
- Las strings son comparables. Dos strings son iguales si coinciden caracter a caracter.
- Los punteros son comparables. Dos punteros son iguales si apuntan a la misma dirección de memoria.
- Los canales son comparables. Dos canales son iguales si fueron creados por la misma llamada a *make* o ambos son `nil`
- Las interfaces son comparables. Dos interfaces son iguales si sus tipos dinámicos y valores dinámicos son iguales; o si ambas son `nil`. El concepto de valor y tipo dinámicos se escapa del enfoque de este texto, pero se profundiza en la especificación oficial de Go

Y así podemos seguir, pero lo importante es que Go ofrece una flexiblidad en la comparabilidad de elementos que, aunque en general la podemos pensar como una buena feature del lenguaje, nos lleva a cambiar nuestras estructuras de datos para ajustarnos a las convenciones del lenguaje.

Debido a este problema, los algoritmos que *asumen* la existencia de una forma de saber si dos elementos son *iguales* tienen que ser modificados.

Existen varias soluciones para este problema el cual me quitó el sueño varios días, pero al final decidí decantarme por la siguiente:

Dado un algoritmo *f(i)* con *i* la entrada del algoritmo, que necesite de una función *cmp(a, b)* para determinar si `a==b`, la implementación de *f* derivará dos algoritmos:

Sea *f(i)* el algoritmo original sin cambios, al cual vamos a agregarle la restricción de que retorne un error si detecta que el tipo de la estructura no es comparable.

Sea *fFunc(i, g(a,b))* un algoritmo derivado, el cual en esencia es *f(i)* pero con la diferencia de que, dado que no le damos una restricción como a *f*, el algoritmo no tiene la garantía de que tiene una forma de comparar elementos, el usuario debe de proporcionar la funcion *cmp(a,b)* que usará el algoritmo para funcionar.

Vamos a traducirlo a un ejemplo más concreto:

El método Equal es un algoritmo general que todas nuestras Colecciones (y posiblemente también las estructuras que no sean colecciones) deben de implementar. A grandes rasgos, Equal nos permite comparar dos estructuras de datos del mismo tipo y retornar true si ambas estructuras son iguales, false en caso contrario.

El algoritmo para realizar esta operación es sencillo: realizamos un recorrido a través de la estructura y vamos comparando sus elementos uno a uno: si logramos terminar el recorrido sin determinar que alguno de los elementos entre las estructuras son distintos, entonces podemos afirmar con seguridad que ambas estructuras son iguales.

Inmediatamente se exhibe el problema que vimos: ¿Cómo determinamos que dos elementos son iguales?. Si los elementos de nuestra estructura son de tipo comparable, podemos garantizar con seguridad que usar el operador == nos permite realizar esta aserción y no vamos a tener problemas en tiempo de ejecución, por lo que la firma para Equals puede ser la siguiente:

```
func (e *Estructura[V]) Equal(e2 *Estructura[V]) (bool,error){...}
```

Dentro del funcionamiento de Equals realizamos la verificación de que V sea un tipo comparable. Si V no es un tipo comparable, entonces inmediatamente retornamos un error.

Luego, para los tipos que no sean comparables directamente, ofrecemos el método EqualFunc, el cual le pide al usuario una función para comparar los elementos.

```
func (e *Estructura[V]) Equal(e2 *Estructura[V], cmp func(V,V)) (bool,error){...}
```

Mi decisión para decantarme por esta convención no es enteramente personal, es de hecho una suerte de convención idiomática dentro del lenguaje que podemos ver en el package de slices. No directamente de la misma forma, porque en este paquete se utilizan funciones globales, lo cual facilita bastante la verificación de que V sea comparable, pero es aquí donde debo admitir que entra mi opinión personal: no me gusta usar funciones globales.

El hecho de que estos métodos sean métodos y no funciones globales nos trae una dificultad para realizar la verificación de que el tipo que guarda una estructura de datos es comparable: el sistema de tipos de Go no permite restringir un método a un subconjunto de tipos genéricos si la estructura original no estaba ya restringida.

Es decir, como siempre vamos a definir nuestras estructuras como `Estructura[V any]`, no tenemos una forma en tiempo de compilación de determinar si el método Equal debe existir o no. Si ya dijimos en la definición de nuestra Estructura que V no tiene requerimentos (implementando `any`), no podemos luego pedirle que sea `comparable`. Entonces, esta validación debe de trasladarse a ser realizada en tiempo de ejecución.

Para lograrlo, recurrimos al paquete *reflect*. La solución consiste en realizar una inspección del tipo V justo antes de iniciar el algoritmo. Si la inspección nos dice que el tipo no soporta el operador `==`, abortamos la operación de forma segura. Esto se traduce a que nuestro método para evaluar si un tipo sería comparable dentro de una función así sería de esta forma:

```
var zero V
tipo := reflect.TypeOf(&zero).Elem()

if !tipo.Comparable() {
 return false, fmt.Errorf("El tipo %T no es comparable; usa EqualFunc", zero)
}
```

Es importante utilizar con cuidado y sobriedad esta verificación, pues todas las operaciones que involucran reflexión son inherentemente lentas.

6 Sobre ToString

El método toString en Java se utiliza para retornar una representación escrita del objeto. Esta representación en su documentación se especifica como "concisa pero informativa que sea fácil de leer por una persona". Si nos ponemos a investigar la documentación de Golang en busca de un método similar, podemos encontrar la interfaz fmt.Stringer. Esta interfaz pide implementar un método String el cual es el equivalente directo de un toString en Java, en el sentido de que es el que le indica a Golang cómo generar dicha representación escrita del objeto.

Para abrazar las raíces *Javaescas* de este texto, todas las estructuras de datos van a implementar esta interface, lo que nos permitirá decir que todas nuestras estructuras de datos tienen una representación escrita.

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) String() (s String, err Error){
}
```

7 Colecciones

Casi todas, si no es que directamente todas las estructuras que vamos a implementar son colecciones... al intentar escribir esta parte del libro, y al intentar leerla, se antojaría definir lo que es una colección, pero de hecho acabo de tener un Deja Vu a mis clases de Álgebra Superior, donde nos dimos cuenta de que si quisiéramos dar una definición formal para conjunto/colección entonces estamos metidos en un grave problema relacionado con posibles definiciones circulares o vaguedad en las que no lo sean... entonces, para evitarnos este problema, vamos a definir nuestras colecciones no desde el significado real de esta palabra, si no desde el comportamiento que habríamos de esperar de una colección. Una colección debería de contener elementos, con los que podríamos realizar las siguientes operaciones:

- Agregar elementos.
- Eliminar elementos.
- Verificar si un elemento existe dentro de la colección.
- Saber si la colección está vacía.
- Obtener el número de los elementos de su interior.
- Limpiar la colección, es decir, despojarla de sus elementos.

- Determinar si es igual a otra colección.
- Retornar una representación escrita de sí misma.

Además, todas las estructuras que caigan bajo la definición de colección deberían de ser iterables. Es aquí donde resulta orgánico definirnos otra interfaz llamada Coleccion, la cual extienda a Iterable e implemente todos los métodos necesarios para cumplir con las funcionalidades que hemos platicado hemos de tener.

```
package interfaces

import "iter"

type Coleccion[V any] interface{
 Agrega(elemento V) (error)
 Elimina(elemento V) (error)
 EliminaFunc(elemento V, cmp func(V,V) bool) (error)
 Contiene(elemento V) (bool, error)
 ContieneFunc(elemento V, cmp func(V,V) bool) (bool, error)
 EsVacia() (bool, error)
 GetElementos() (int, error)
 Limpia() (error)
 All() iter.Seq[V]
 Equal(coleccion Coleccion[V]) (bool, error)
 EqualFunc(coleccion Coleccion[V], cmp func(V,V) bool) (bool, error)
 String() (string)
}
```

Todas las funciones que requieren de comparabilidad entre elementos han sido divididas en su variable original y su variable *Func* conforme a lo discutido en la sección correspondiente.

Además, podrás notar que todos los métodos definidos siempre regresan un tipo error, esto es debido a una característica particular de Golang relacionada al manejo de errores en Go. Por ahora no vamos a ahondar en ello, vamos a dejar simplemente que esto afecte en las declaraciones de los métodos, pero posteriormente se abordará de manera detenida.

También podemos señalar una característica importante de Golang respecto a la implementación de interfaces. En la mayoría de lenguajes de programación, para definir que una clase o tipo implementa una interfaz, es

necesario hacerlo de manera explícita, con alguna palabra segura del lenguaje que nos permita escribir una declaración del tipo:

```
public interface Coleccion<T> extends Iterable<T> {
    ...
}
```

En cambio, en Golang, la implementación de una interfaz es implícita; es decir, un tipo debe definir todos los métodos definidos por una interfaz, y ya con esto se considera que dicho tipo (o interfaz en este caso) implementa a otro. Por eso, en la definición de interfaz de Colección dada previamente, la implementación de la interfaz Iterable viene implícita del hecho de que la interfaz pide implementar también el método All() iter.Seq[V]

Y finalmente, la definición de esta ultima interfaz nos deja preparados para comenzar a implementar la primera estructura de datos de este tour: Las Listas.

8 Listas

Si pensamos solamente en una "Lista" así nada más, con solamente esta palabra para buscar definirla, podemos acomodar dentro de esta definición a una amplia gama de estructuras de datos. Cuando hablamos de una "lista" más que hablar de una estructura de datos concreta, podemos pensar incluso en una categoría de estructuras de datos que suelen obedecer al concepto sencillo ejemplificable con el ejemplo cotidiano de "una lista de supermercado".

La definición más débil y flexible de una lista es "una serie de elementos ordenados de manera consecutiva", ya más adelante veremos que podemos hacernos muchos líos con esta definición tan sencilla y por eso digo que, a mi consideración, esto es más una categoría. En este capítulo, vamos a pasearnos por algunas de las estructuras de datos que se pueden considerar una "Lista". Incluyendo los slices, la estructura de datos característica de Golang que puede entrar dentro de esta categoría y que veremos más adelante.

Y ya para terminar y ponernos manos a la obra, cabe decir que toda esta categoría de estructuras de datos puede y va a implementar la interfaz Colección que vimos en el capítulo anterior, porque esta interfaz engloba los comportamientos que esperamos de una Lista, incluyendo el comportamiento obvio de que debe de ser iterable, pues al tener elementos ordenados, podemos recorrerla de principio a fin con un iterador.

8.1 Singly Linked Lists

La forma de lista más sencilla en la cual podemos pensar para implementar es la Singly Linked List. Esta es la estructura de datos considerable como lista más primitiva en la que podemos pensar, pues fué implementada en 1957 en el lenguaje de programación IPL.

Para cubrir la definición más débil que vimos de una lista en la sección anterior, la forma más simple es hacer que cada elemento de una lista tenga una referencia o indicación de quién es su sucesor. De esta forma, como si fuera una serie de elementos amarrados por varios lazos, podemos tomar el primer elemento e ir recorriendo estos enlaces hasta llegar al último.

Antes de definir la estructura vamos a definir su unidad atómica: el nodo de lista.

8.1.1 Nodo Simple

Un nodo es para una lista lo que un eslabón es para una cadena (de las de acero que usamos para amarrar nuestras bicis); es esa estructura de datos auxiliar que vamos a usar para que cada uno de los elementos de nuestras listas tengan las referencias necesarias para que la lista sea recorrible. En esta primera estructura de Singly Linked Lists, este nodo se define de la siguiente manera:

```
type nodoSimple[V any] struct {
 elemento V
 siguiente *nodoSimple[V]
}
```

Un Nodo Simple (la forma en la que llamaremos el nodo de una Singly Linked List) engloba solamente dos cosas: el elemento que contiene y un puntero al siguiente Nodo Simple que sigue en la Singly Linked List.

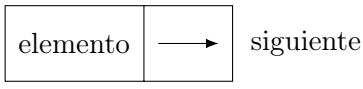


Figure 1: Representación visual del Nodo Simple. Se almacena el elemento y el puntero al siguiente nodo.

Para respetar el principio de encapsulamiento, el Nodo Simple -al igual que cualquier abstracción interna que necesitemos para una estructura de

datos- será una clase privada, en el sentido de que solamente va a ser usada dentro de la clase SinglyLinkedList, y ni su comportamiento ni funcionamiento será expuesto por arriba de la capa de abstracción que conforma la lista en sí.

Una vez dicho esto y definido el nodo simple, podemos comenzar a construir esta estructura de datos.

8.1.2 Esqueleteo de la clase

```
package lists
import (
 "iter"
 "github.com/IsaacNietoG/goDataStructs/interfaces/coleccion"
)

<<definicionDeNodoSimple>>

type SinglyLinkedList[V any] struct{
 head *nodoSimple[V]
 tail *nodoSimple[V]
 size int
}

var _ Coleccion[any] = (*SinglyLinkedList[any])(nil)
```

La última linea de esta sección de código es un truco de Golang. Debido a que la implementación de Interfaces en Go es implícita, es muy fácil que se nos escape la implementación de algún método necesario para que una clase pueda ser considerada implementación de una interfaz. Y es muy probable que esto nos lleve a errores posteriores en tiempo de ejecución, lo cual es altamente indeseable.

Con esta línea final podemos pedirle al compilador que nos "revise la tarea" pues lo que hace es:

- Intenta declarar una variable sin nombre (por eso el _), lo cual le da la pista al compilador de que no debe de guardarla en memoria
- La intenta declarar como una instancia de Colección.
- Le asigna el valor de un puntero hacia una SinglyLinkedList

- Esta SinglyLinkedList funcionalmente no existe, pues está siendo casteada desde *nil*, en realidad es un puntero fantasma solamente para intentar realizar la acción como tal.

Es buena práctica integrar esta verificación en nuestras clases de Golang, para detectar errores de manera temprana en el desarrollo y garantizar que sí estamos implementando las interfaces que queremos; y extender las clases que queramos también.

Luego declaramos los métodos necesarios para que la estructura implemente Colección

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) Agrega(elemento V) (error){
 <<implementacionAgregaSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Elimina(elemento V) (error){
 <<implementacionEliminaSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) EliminaFunc(elemento V, cmp func(V,V) bool) (error){
 <<implementacionEliminaFuncSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Contiene(elemento V) (bool,error) {
 <<implementacionContieneSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) ContieneFunc(elemento V, cmp func(V,V) bool) (bool,error)
 <<implementacionContieneFuncSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) EsVacia() (bool, error) {
 <<implementacionEsVaciaSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) GetElementos() (int, error) {
 <<implementacionGetElementosSLL>>
}
```

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) Limpia() (error){
 <<implementacionLimpiaSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) All() iter.Seq[V] {
 <<implementacionAllSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Equal(coleccion Coleccion[V]) (bool,error){
 <<implementacionEqualSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) EqualFunc(coleccion Coleccion[V], cmp func(V,V) bool) (bo
 <<implementacionEqualFuncSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) String() (string){
 <<implementacionStringSLL>>
}
```

Así mismo, también vamos a agregar algunos métodos propios de la clase, que van a ser los siguientes:

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) AgregaInicio() (error){
 <<implementacionAgregaInicioSLL>>
}
```

Por omisión, todos los elementos que agreguemos a una lista serán al final, pero también nos es conveniente tener un método por si queremos agregar un elemento al mero inicio de la lista.

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) Inserta(indice int, elemento V) (error){
 <<implementacionInsertaSLL>>
}
```

Queremos poder insertar un elemento en un lugar arbitrario, para eso es el método inserta, el cual dado un índice y elemento, inserta dicho elemento en dicho índice y recorre los consecuentes.

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) EliminaPrimero() (V, error){
 <<implementacionEliminaPrimeroSLL>>
}
```

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) EliminaUltimo() (V, error){
 <<implementacionEliminaUltimoSLL>>
}
```

Siempre podemos eliminar tanto el primer elemento de la lista como el último. Y de una vez podemos aprovechar para que estos métodos nos regresen el elemento que eliminan.

De la misma forma, a veces solamente queremos obtener estos elementos sin eliminarlos, para eso serán getPrimero y getUltimo

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) GetPrimero() (V, error){
 <<implementacionGetPrimeroSLL>>
}

func (l *SinglyLinkedList[V]) GetUltimo() (V, error){
 <<implementacionGetUltimoSLL>>
}
```

Luego, necesitamos un método para copiar la lista.

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) Copia() (*SinglyLinkedList[V], error){
 <<implementacionCopiaSLL>>
}
```

Y obviamente vamos a querer un método para obtener el i-ésimo elemento de la lista.

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) Get(i int) (V, error){
 <<implementacionGetSLL>>
}
```

E inversamente, dada la referencia de un elemento (que sabemos existe en la lista) podemos saber el índice que ocupa en la misma con el siguiente método.

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) IndiceDe(elemento V) (int, error){
 <<implementacionIndiceDeSLL>>
}
```

Debido a que esta función también requiere de comparabilidad entre elementos, IndiceDe debe tener su respectiva versión Func.

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) IndiceDeFunc(elemento V, cmp func(V,V) bool) (int, error)
 <<implementacionIndiceDeSLL>>
}
```

Con este último método, ya tenemos una lista de métodos que implementar para nuestra primera estructura de datos, quedando de la siguiente forma:

```
package lists
import (
 "iter"
 "github.com/IsaacNietoG/goDataStructs/interfaces/Coleccion"
)

type nodoSimple[V any] struct {
 elemento V
 siguiente *nodoSimple[V]
}

type SinglyLinkedList[V any] struct{
 head *nodoSimple[V]
 tail *nodoSimple[V]
 size int
}

var _ Coleccion[any] = (*SinglyLinkedList[any])(nil)

func (l *SinglyLinkedList[V]) Agrega(elemento V) (error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Elimina(elemento V) (error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) EliminaFunc(elemento V, cmp func(V,V) bool) (error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Contiene(elemento V) (bool,error) {...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) ContieneFunc(elemento V, cmp func(V,V) bool) (bool,error)

func (l *SinglyLinkedList[V]) EsVacia() (bool, error) {...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) GetElementos() (int, error) {...}
```

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) Limpia() (error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) All() iter.Seq[V] {...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Equal(coleccion Coleccion[V]) (bool,error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) EqualFunc(coleccion Coleccion[V], cmp func(V,V) bool) (bo

func (l *SinglyLinkedList[V]) String() (string){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) AgregaInicio() (error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Inserta(indice int, elemento V) (error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) EliminaPrimero() (V, error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) EliminaUltimo() (V, error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) GetPrimero() (V, error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) GetUltimo() (V, error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Copia() (*SinglyLinkedList[V], error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) Get(i int) (V, error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) IndiceDe(elemento V) (int, error){...}

func (l *SinglyLinkedList[V]) IndiceDeFunc(elemento V, cmp func(V,V) bool) (int, error)
```

8.1.3 Implementaciones de los métodos

Una vez definidos los comportamientos que se nos antojaría que tuviera nuestra estructura de datos, procedemos a comenzar a implementarlos. Para implementar los comportamientos de una clase primero tenemos que entender claramente a nivel conceptual lo que queremos que nuestra clase sea y haga. Entonces, vamos a regresar al pizarrón para pensar en qué es lo que hace a una Singly Linked List una Singly Linked List.

La característica principal de este tipo de lista es que, como vimos previ-

amente, cada uno de nuestros nodos solamente contiene una referencia a su siguiente nodo. De aquí proviene el nombre de *Singly* Linked List. La implicación más importante que genera este hecho es que solamente la podremos recorrer en una sola dirección: desde la cabeza hasta el rabo. No podemos recorrerla de reversa, porque una vez llegado a un nodo, no tenemos una ruta para regresar a su anterior. Visualmente esto se vería de la siguiente forma:

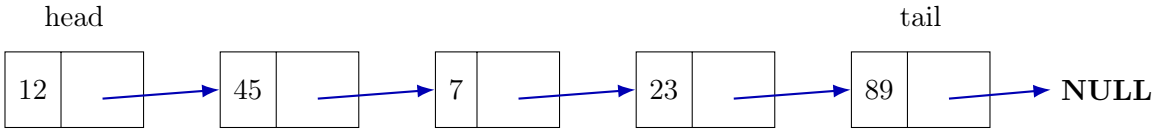


Figure 2: Representación de una lista enlazada simple con 5 elementos enteros.

Visualmente podemos entonces comenzar a entender el mecanismo más general que vamos a utilizar para recorrer la lista; el cual es movernos referencia por referencia siempre hacia adelante, porque no tenemos forma de mirar atrás. Conceptualmente esto es sencillo de describir, como la mayoría de algoritmos necesarios para implementar estos comportamientos necesarios, sin embargo, van a ir naciendo ciertas particularidades cuando vayamos realizando las implementaciones.

Es importante señalar que los algoritmos existen como una entidad conceptualmente separada de sus implementaciones, un algoritmo puede ser implementado en varios lenguajes de programación, siempre que el programador responsable se encargue de ajustarse a las sutilezas del lenguaje en el que lo vaya a implementar.

En el libro del cual me inspiro para este texto, todos los algoritmos son vistos sin necesariamente ahondar en la implementación necesaria para que las estructuras vistas sean funcionales; sin embargo, para que la librería generada por este texto sea utilizable, es necesario que este texto sí se preocupe por las implementaciones de los algoritmos que veamos. La diferencia en este hecho reside en las filosofías de ambos textos y los resultados que buscan generar cada uno: uno es un libro con fines didácticos que busca que sus lectores se ensucien las manos para entender los conceptos, el otro (este mismo) es probablemente el soliloquio de un estudiante, que busca generar una biblioteca utilizable a través de programación letrada.

De todas formas, es importante también señalar que en muchos casos los algoritmos como tal son directamente replicados del libro que inspira este texto, excepto en los casos donde no lo sea, lo cual también será aclarado.

Entonces, en cada algoritmo siempre nos vamos a detener a ver las características de la implementacion decidida por el autor del texto (yo merengues).

1. Agrega Este método es para agregar elementos a una lista, por omisión se hace al final. Tenemos dos casos diferentes: cuando la lista es vacía, y cuando contiene al menos un elemento.

   En cualquiera de los dos casos, las instrucciones en comuń consisten en construir un nuevo nodo n e incrementar el contador de elementos en la lista. Posterior a esto, realizamos la verificación necesaria para partir a uno de los dos casos, quedando hasta el momento de esta forma la implementación:

```
n:= &nodoSimple[V]{elemento: elemento}
l.size++

if l.tail == nil {
<<caso1AgregaSLL>>
} else {
<<caso2AgregaSLL>>
}

return nil
```

   Para verificar que la lista es vacía, podemos verificar sencillamente comprobando si el rabo r es 'nil'. Si esto se cumple, actualizamos cabeza y rabo a referencias de 'n' y terminamos.

```
 l.head = n
 l.tail = n
```

   Antes de continuar, decir que podemos suponer con seguridad que el puntero *siguiente* de un nodoSimple se inicializa en 'nil', mismo caso para los punteros *head* y *tail* de la estructura en sí. Esto es verdad porque en Golang se cumple que los atributos de tipo puntero ('*T') se inicializan en 'nil', esto no es verdad para todos los atributos, pero concretamente para este caso sí lo es.

Si la lista no es vacía, entonces el rabo r es distinto de 'nil'; haremos que el siguiente del rabo sea 'n' y actualizamos la referencia de tail a n.

```
 l.tail.siguiente = n
 l.tail = n
```

Así quedando la implementación final de este algoritmo:

```
func (l *SinglyLinkedList[V]) Agrega(elemento V) (error){

n:= &nodoSimple[V]{elemento: elemento}
l.size++

if l.tail == nil {
 l.head = n
 l.tail = n
} else {
 l.tail.siguiente = n
 l.tail = n
}

return nil

}
```

2. Elimina

   Esta es la primera de las funciones que vamos a implementar en este texto que necesita de una forma de comparación para descubrir si un elemento es el que estamos buscando o no. Como tal, en la explicación de la implementación de esta función recae la importancia de tener muy claro los mecanismos que vamos a utilizar para esto.

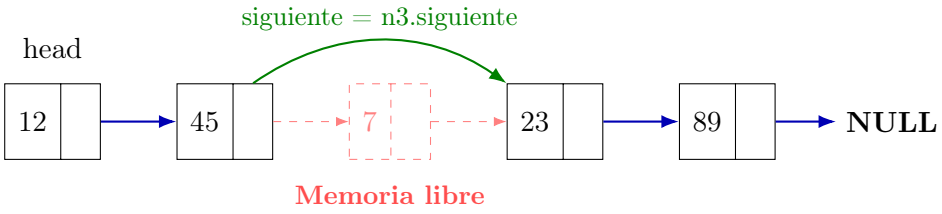
   Primero que nada, decir que en todos los métodos que tengan versión *normal* y versión *Func* voy a implementar primero la versión Func. Por qué? Porque una vez implementada la versión Func de una de estos métodos, es trivial utilizar el método Func dentro del método original para que funcione correctamente. Lo haremos de la siguiente forma:

   El caso trivial es que la lista esté vacía, lo cual, al igual que en el método Agrega, lo verificaremos con la cola de la lista, si la cola es 'nil' la lista está vacía y terminamos.

```
if l.tail == nil {
 return fmt.Errorf("La lista está vacía")
}
```

Luego comenzaremos a recorrer la lista. Debido a que esta es una lista simplemente ligada, debemos de -otra vez- tener en cuenta que cada vez que "pasamos" un nodo, no tenemos forma de regresar a él. Siempre podemos mirar hacia adelante del nodo que tengamos fijado, pero nunca hacia atrás (como la vida misma). Entonces, el nodo que tengamos fijado en un momento dado mientras recorremos la lista es el nodo más anterior al que podemos tener acceso, con esto presente, hay que recorrer la lista con cuidado.

Cuando eliminamos un nodo de la lista, visualmente lo que hacemos es "saltarlo", es decir, que su nodo anterior pase directamente al que le seguía sin pasar por el que queremos eliminar. De esta manera, el nodo eliminado se vuelve inalcanzable desde la lista, y por lo tanto, eventualmente el recolector de basura de Golang se deshará de él.



Esto ya nos da una noción bastante firme de que para buscar el nodo a eliminar, siempre vamos a fijarnos en el nodo siguiente al nodo que tengamos fijado. Si el nodo a eliminar fuera el nodo que tenemos fijado, no tendríamos forma de realizar este algoritmo, pues no tendríamos forma de tomar al nodo anterior y cambiar su referencia siguiente.

Aclarado esto, comenzamos a elaborar el método general. Primero necesitamos encontrar dentro de la lista el nodo del elemento a eliminar. Esta es la primera parte del algoritmo. Para ello, vamos a usar la función comparadora proporcionada por el usuario, la cual, como vimos inicialmente, debe de retornar true si el elemento actual es el elemento que buscamos y false en caso contrario.

Hay que observar primero un caso particular: el caso en el que la cabeza de la lista contenga el elemento a eliminar. Si la cabeza de la lista contiene el elemento a eliminar, simplemente "descabezamos" la lista y colocamos el nodo siguiente como nueva cabeza. Igual, esto no es

tan sencillo porque también de paso comprendemos el caso particular en el que ese fuera el último nodo de la lista, en cuyo caso también hay que encargarnos de fijar a ´nil´ la cola de la lista, para simbolizar que ahora la lista está completamente vacía.

```
if cmp(l.head.elemento, elemento) {
 l.size--
 l.head = l.head.siguiente
 if l.head = nil {
  l.tail = nil
 }
 return nil
}
```

Luego, si este no es el caso, podemos comenzar a buscar en el resto de la lista. Fijamos un nodoPrevio (le llamo así porque siempre será el nodo previo al que tendríamos que eliminar) y es el que iremos cambiando. Observamos el elemento del nodo siguiente al que fijamos, si resulta ser igual al que necesitamos, entonces podemos comenzar con la lógica de eliminación, caso contrario, seguimos recorriendo la lista cambiando el nodo fijado a su siguiente. Ya de paso, haremos esto hasta que nos quedemos sin nodos. Si llegamos al nodo rabo y no hemos encontrado el elemento (sabemos que es el nodo rabo por su siguiente nulo) entonces retornamos el error correspondiente.

```
nodoPrevio := l.head
for nodoPrevio.siguiente != nil {
 if cmp(nodoPrevio.siguiente.elemento, elemento){
  <<logicaDeEliminacionSLL>>
 }
 nodoPrevio = nodoPrevio.siguiente
}

return fmt.Errorf("Elemento no encontrado")
```

Si encontramos el elemento, realizamos la lógica de eliminación vista previamente: saltamos el nodo eliminado. No sin antes realizar otra

verificación para un caso particular adicional: el nodo a eliminar es la tail de la lista. En este caso, simplemente agregamos la instrucción de fijar el nodo previo como la nueva tail de la lista, el resto de instrucciones son iguales. Para verificar si hemos caido en este caso, verificamos si el siguiente del nodo a eliminar es ´nil´; esto solo puede ocurrir si el nodo a eliminar es la tail de la lista.

```
if nodoPrevio.siguiente.siguiente = nil {
 l.tail = nodoPrevio
}
nodoPrevio.siguiente = nodoPrevio.siguiente.siguiente
l.size--
return nil
```

Quedando el método completo de la siguiente manera:

```
if l.tail == nil {
 return fmt.Errorf("La lista está vacía")
}
if cmp(l.head.elemento, elemento) {
 l.size--
 l.head = l.head.siguiente
 if l.head = nil {
  l.tail = nil
 }
 return nil
}

nodoPrevio := l.head
for nodoPrevio.siguiente != nil {
 if cmp(nodoPrevio.siguiente.elemento, elemento){
  if nodoPrevio.siguiente.siguiente = nil {
   l.tail = nodoPrevio
  }
  nodoPrevio.siguiente = nodoPrevio.siguiente.siguiente
  l.size--
  return nil
 }
 nodoPrevio = nodoPrevio.siguiente
```

```
}

return fmt.Errorf("Elemento no encontrado")
```

9 Ordenamientos