Detección de Deadlocks en Rust en tiempo de compilación mediante Redes de Petri

Horacio Lisdero Scaffino

Facultad de Ingeniería
Universidad de Buenos Aires

19 de febrero del 2023

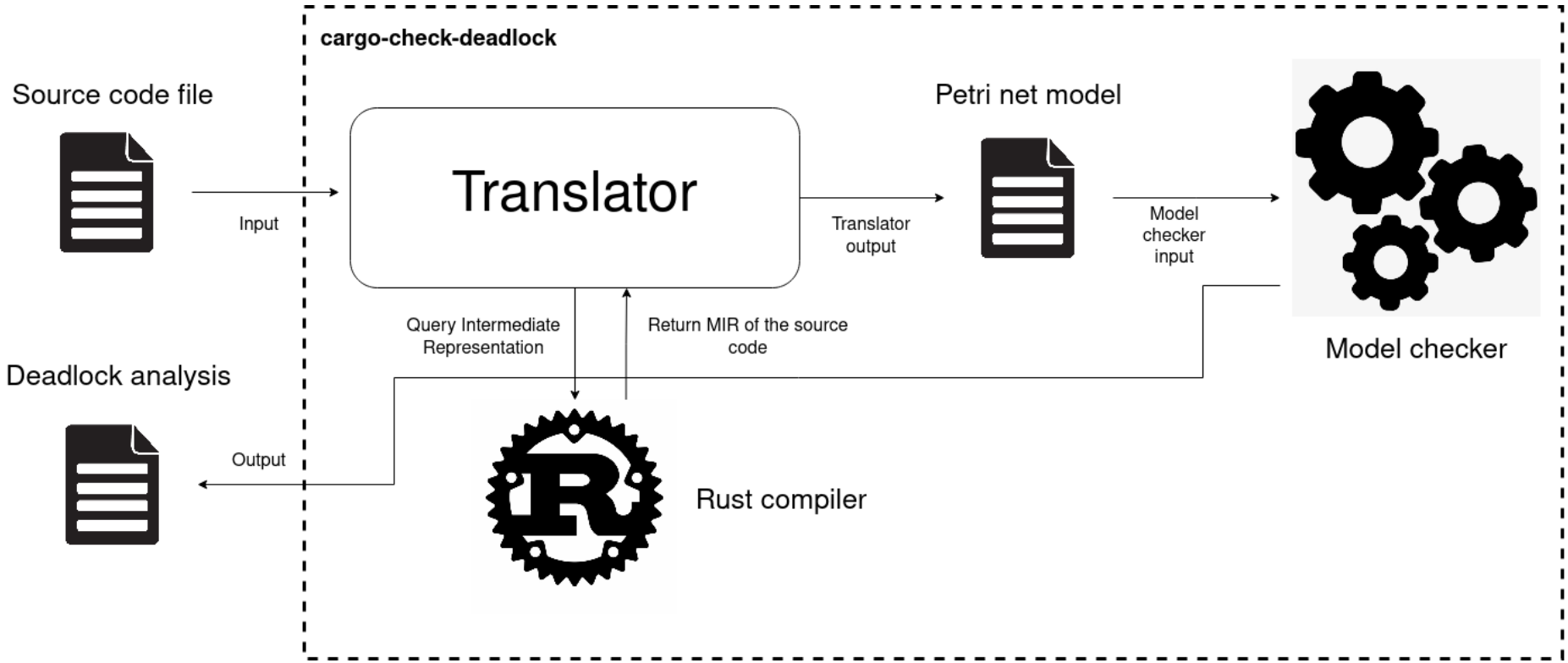
.UBAfiuba
FACULTAD DE INGENIERÍA

Agenda

Agenda

Una vista general de la herramienta

El traductor es el componente principal. El verificador de modelos y el compilador de Rust, *rustc*, son dependencias.



Agenda

Agenda

¿Qué es Rust?

Rust es un lenguaje de programación multiparadigma de uso general que busca ofrecer a los desarrolladores una forma segura y eficiente de escribir código de bajo nivel.

¿Qué es Rust?

Rust es un lenguaje de programación multiparadigma de uso general que busca ofrecer a los desarrolladores una forma segura y eficiente de escribir código de bajo nivel.

- Uso seguro de la memoria (*Memory safe*)
- Compilado a código máquina, con un *runtime* mínimo
- Expresividad de lenguaje de alto nivel
- Performance de lenguaje de bajo nivel (similar a C o C++)

Breve línea de tiempo de Rust

- 2007 Inicio como un proyecto personal de Graydon Hoare, un programador en Mozilla
- 2009 Mozilla comienza a patrocinar oficialmente el proyecto
- 2015 Primera versión estable 1.0
- 2016 Mozilla lanza Servo, un motor de navegador construido con Rust
- 2019 Se estabiliza el soporte de `async`/`await`
- 2021 AWS, Huawei, Google, Microsoft y Mozilla crean la Rust Foundation
- 2021 El proyecto Android fomenta el uso de Rust para los componentes del SO por debajo del ART
- 2022 El kernel de Linux añade soporte para Rust junto con C
- 2023 8 años consecutivos el lenguaje de programación más querido en la Stack Overflow Developer Survey

Uso seguro de la memoria

Logra un uso seguro de la memoria sin recurrir a un recolector de basura o a un contador de referencias. En su lugar, utiliza el concepto de **ownership** (propiedad) y **borrowing** (préstamo).

Evita una gran variedad de clases de errores en tiempo de compilación:

- Double free
- Use after free
- Punteros colgantes (*Dangling pointers*)
- Condiciones de carrera (*Data races*)
- Pasaje de variables no seguras entre hilos

Si se encuentra una violación de las reglas del compilador, el programa simplemente no compilará.

Agenda

El uso seguro de la memoria es fundamental para la fiabilidad y la seguridad

Investigaciones empíricas han concluido que alrededor del 70 % de las vulnerabilidades encontradas en grandes bases de código en C/C++ se deben a errores de gestión de memoria. Esta elevada cifra puede observarse en proyectos como:

- Android Open Source Project [1],
- los componentes Bluetooth y multimedia de Android [2],
- el Proyecto Chromium detrás del navegador web Chrome [3],
- el componente CSS de Firefox [4],
- iOS y macOS [5],
- productos de Microsoft [6, 7],
- Ubuntu [8]

La adopción de Rust aumenta velozmente

- El proyecto Android Open Source fomenta el uso de Rust para los componentes del SO por debajo del ART [9]
- El kernel Linux versión 6.1 introduce soporte oficial de las herramientas para programar componentes en Rust [10, 11]
- En Mozilla, el proyecto Oxidation se creó en para aumentar el uso de Rust en Firefox y aplicaciones relacionadas. En marzo de 2023, las líneas de código en Rust representan más del 10 % del total en Firefox Nightly [12]
- En Meta, el uso de Rust como lenguaje de desarrollo *server-side* está aprobado y se fomenta desde julio de 2022 [13]
- En Cloudflare, se construyó desde cero un nuevo proxy HTTP en Rust para superar las limitaciones arquitectónicas de NGINX, reduciendo el uso de CPU en un 70 % y el uso de memoria en un 67 % [14]
- En Discord, reimplementar un servicio crucial en Rust proporcionó grandes beneficios de performance y solucionó un problema ligado a la recolección de basura en Go [15]
- En npm Inc, la empresa detrás del registro npm, Rust permitió escalar los servicios ligados a la CPU a más de 1300 millones de descargas diarias [16]
- Un estudio del código basado en Rust descubrió que se ejecuta tan eficientemente que consume la mitad de electricidad que un programa similar escrito en Java, un lenguaje de uso común en AWS [17]

Las herramientas son modernas y fáciles de usar

- cargo, el gestor de paquetes oficial: Formatear, compilar, testear, lint, actualizar y publicar paquetes
- Test harness para pruebas unitarias, pruebas de integración y pruebas en comentarios de documentación (doctests). No se necesitan bibliotecas de terceros
- Un registro público oficial para los paquetes Rust (llamados “crates”): `https://crates.io/`
- Generación automática de un sitio web estático a partir de los comentarios en el código del proyecto. Se publica automáticamente en `https://docs.rs/`
- Un linter oficial incluido en la instalación por defecto que detecta aún más errores y detecta código no idiomático: clippy
- Integración con git, GitHub, VSCode, IntelliJ, entre otros
- Una nueva versión estable del compilador cada 6 semanas [18]

Agenda

Agenda

Definición informal

Una red de Petri es una herramienta de modelado matemático utilizada para describir y analizar el comportamiento de sistemas concurrentes. Proporciona una representación gráfica del estado del sistema y sus transiciones, permitiendo el análisis visual y formal de procesos complejos.

- Lugares: Representan estados en el sistema (*circles*)
- Transiciones: Representan eventos o acciones que ocurren en el sistema (*rectángulos*)
- Tokens: Marcas dentro de lugares que son creadas y consumidas por las transiciones (*puntos dentro de lugares*)

Definición matemática

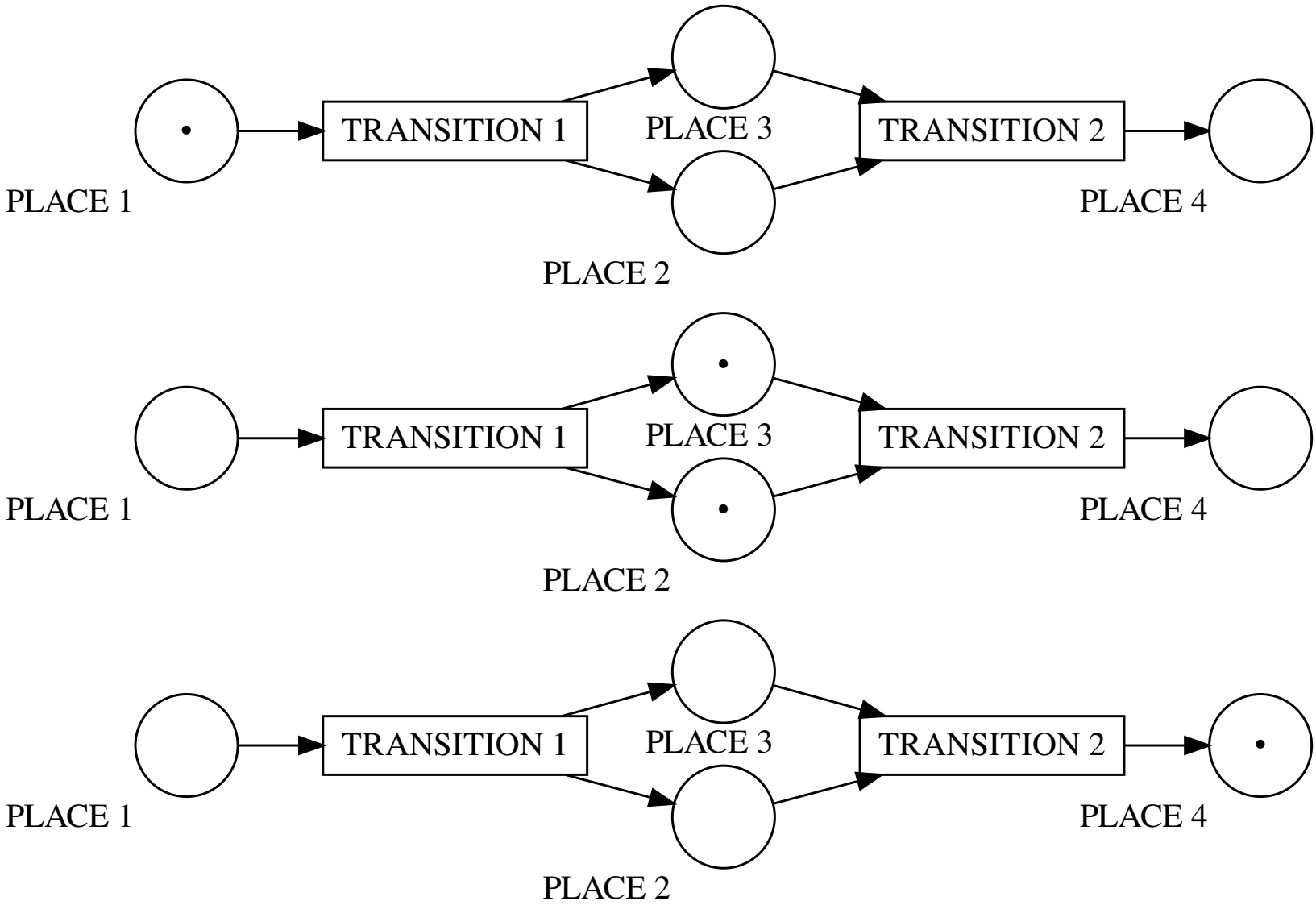
Una red de Petri es una 5-tupla, $PN = (P, T, F, W, M_0)$ donde:

$P = \{p_1, p_2, \ldots, p_m\}$ *es un conjunto finito de lugares,*
$T = \{t_1, t_2, \ldots, t_n\}$ *es un conjunto finito de transiciones,*
$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ *es un conjunto de arcos (relación de flujo),*
$W : F \to \{1, 2, 3, ...\}$ *es una función de peso para los arcos,*
$M_0 : P \to \{0, 1, 2, 3, ...\}$ *es el marcado inicial,*
$P \cap T = \varnothing$ *y* $P \cup T \neq \varnothing$

El grafo es por definición *bipartito*. Solo puede haber aristas:

- de lugares a transiciones
- de transiciones a lugares

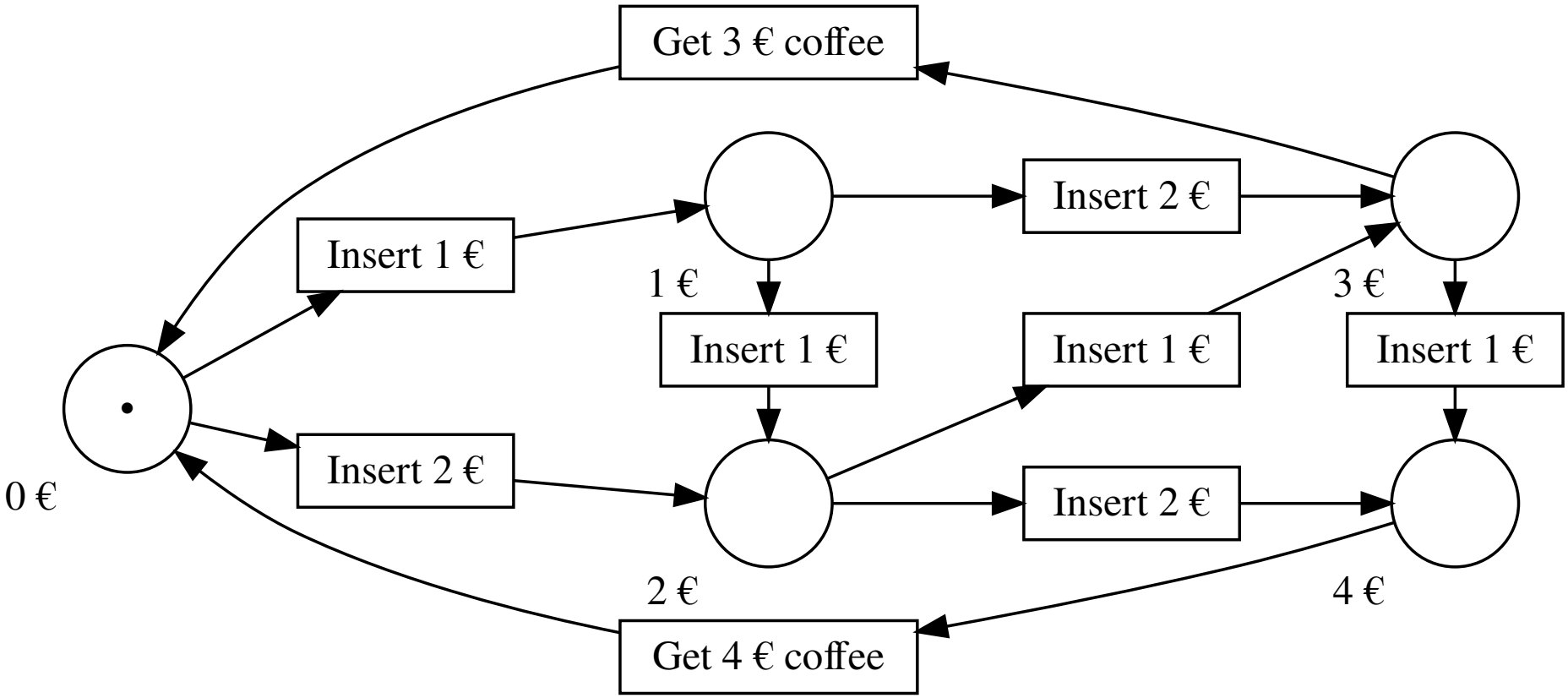
Regla de disparo de transición



Agenda

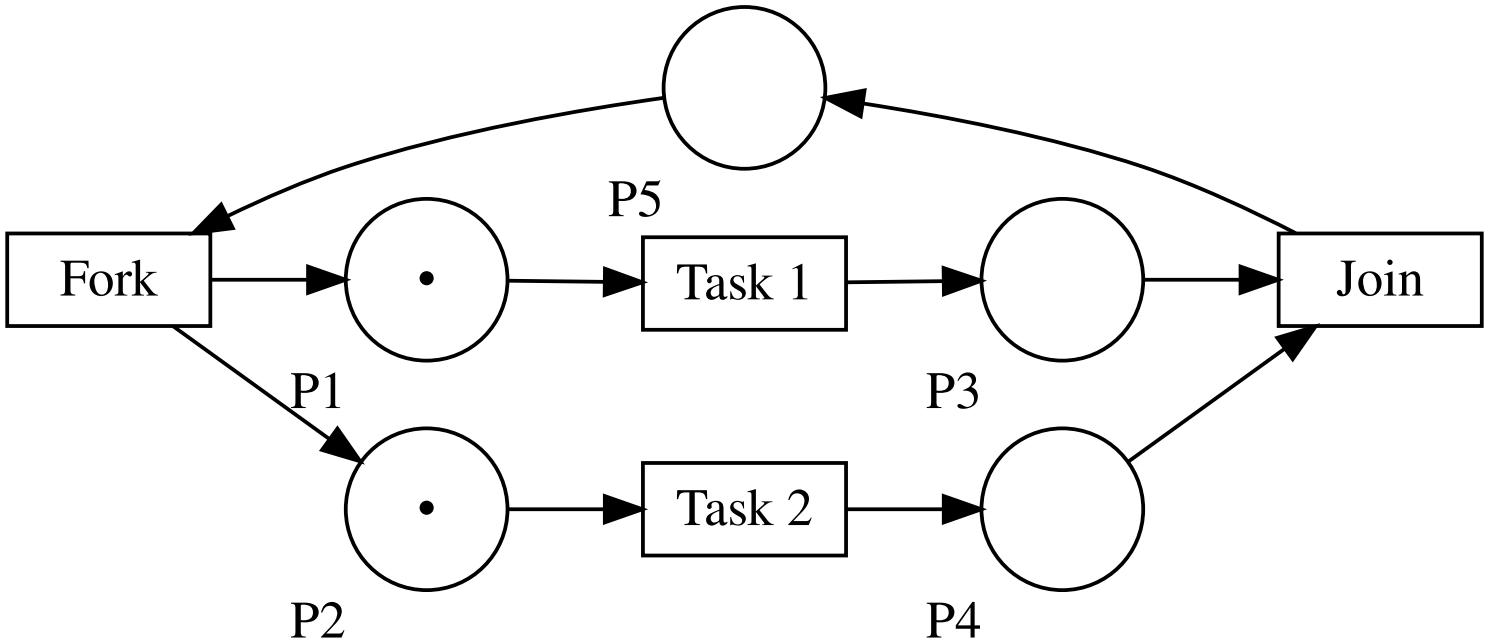
Máquina expendedora

Esta es una máquina de estados finitos (*Finite-state machine*), una subclase de redes de Petri.



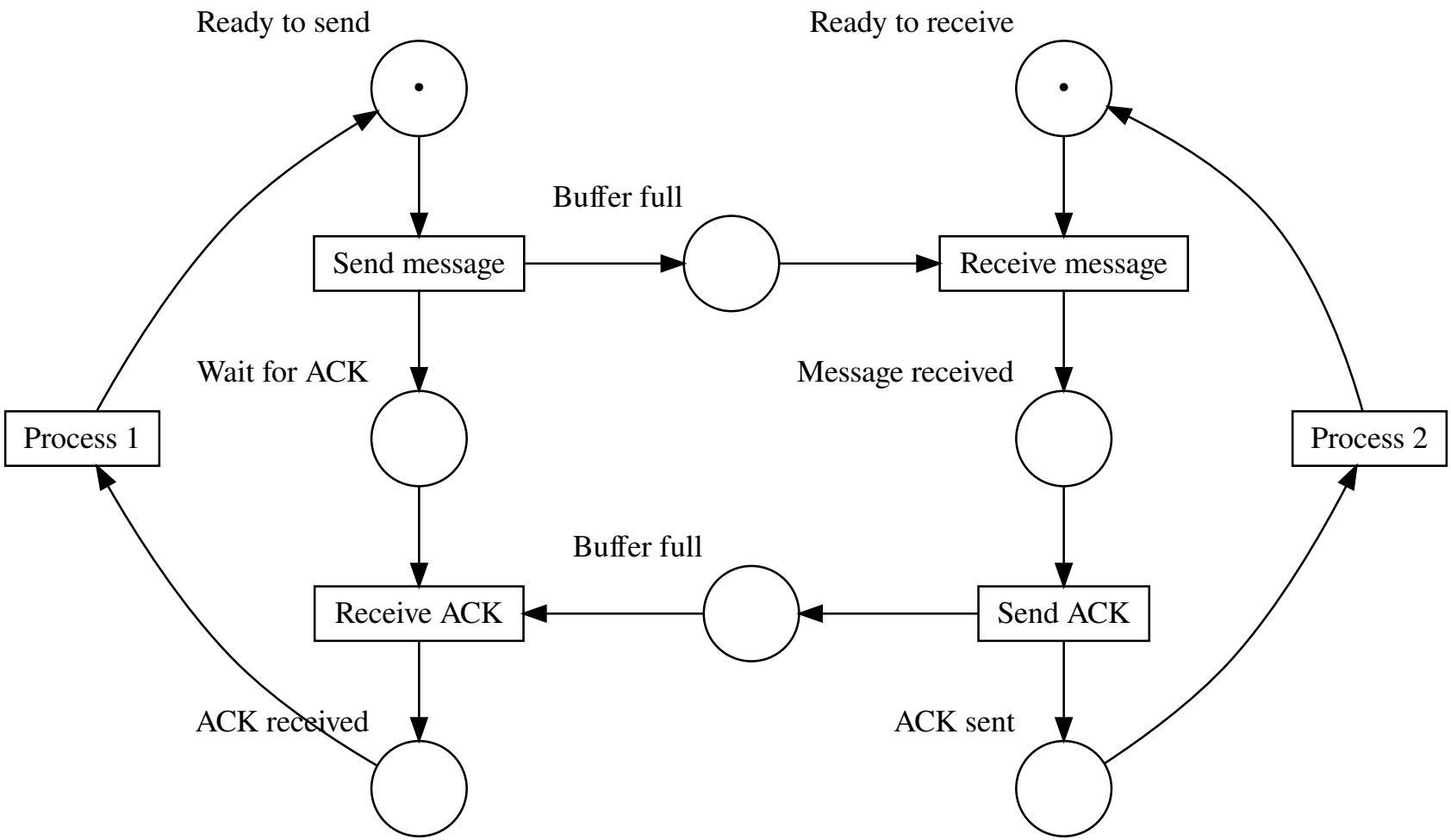
Actividades en paralelo: Fork/Join

Esto es un grafo marcado (*Marked graph*), una subclase de redes de Petri. Nótese la concurrencia entre la Tarea 1 y la Tarea 2. Esto no puede modelarse con una única máquina de estados finitos.



Procotolos de comunicación: Send with ACK

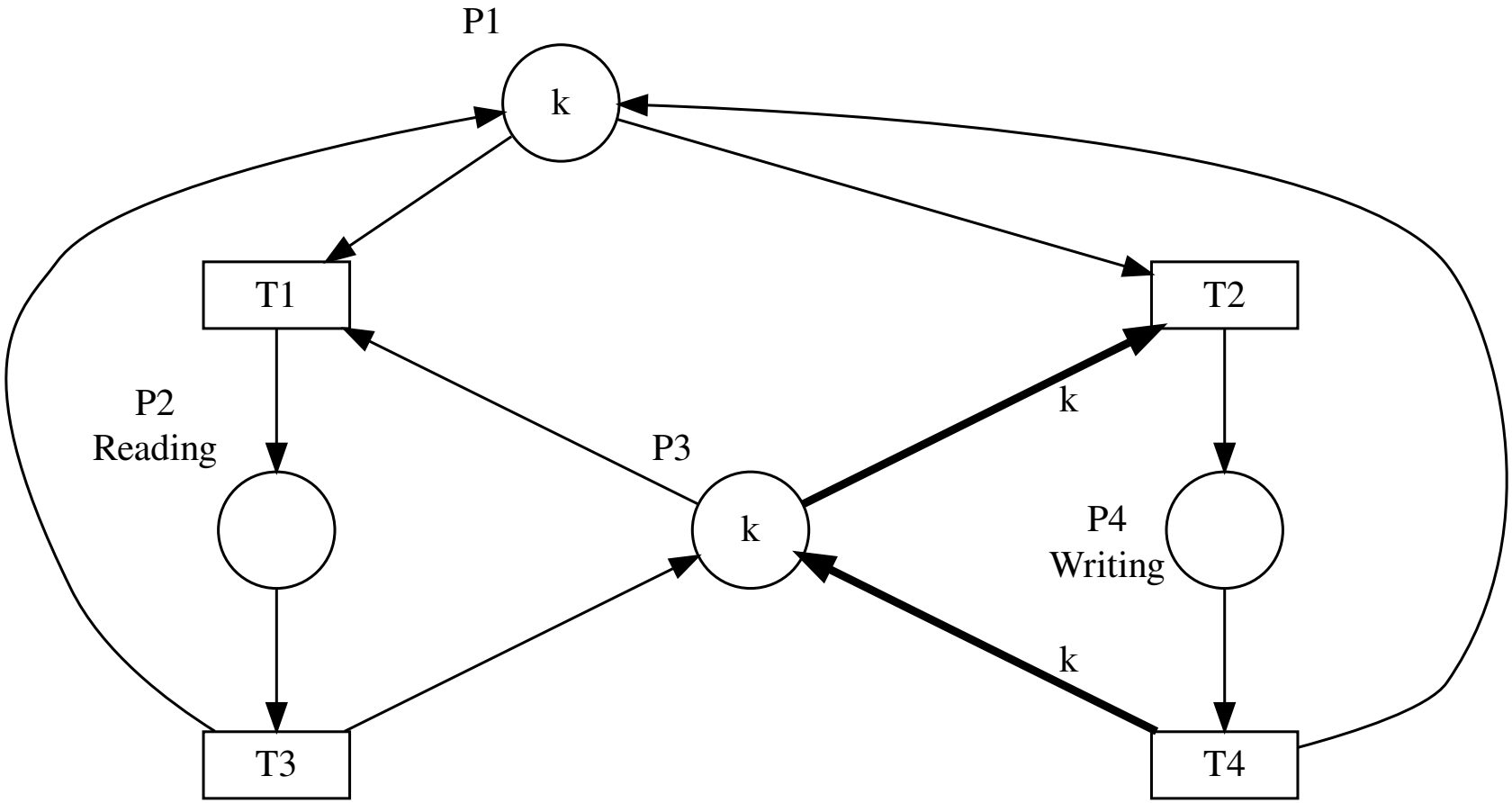
El Proceso 1 envía mensajes al Proceso 2 y espera a recibir un acuse de recibo (*ACK*) antes de continuar. Por simplicidad, no se ha incluido ningún mecanismo de *timeout*.



Sincronización: Lectores y escritores

Un sistema de redes de Petri con k procesos que leen o escriben un valor compartido.

- Si un proceso escribe, entonces ningún proceso puede leer.
- Si un proceso está leyendo, entonces ningún proceso puede escribir.
- Sólo puede haber cero o un proceso escribiendo en cualquier momento dado.



Agenda

Análisis de alcance

Las redes de Petri pueden analizarse utilizando métodos formales para concluir si la red puede alcanzar un deadlock o no. Existe una noción de *liveness* análoga a aquella de los sistemas informáticos.

Análisis de alcance

Las redes de Petri pueden analizarse utilizando métodos formales para concluir si la red puede alcanzar un deadlock o no. Existe una noción de *liveness* análoga a aquella de los sistemas informáticos.

Existen varios verificadores de modelos de última generación e incluso existe un Model Checking Contest que se celebra todos los años. Las herramientas más avanzadas pueden manejar modelos de redes de Petri con más de **70 000 transiciones** y **un millón de lugares**.

Análisis de alcance

Las redes de Petri pueden analizarse utilizando métodos formales para concluir si la red puede alcanzar un deadlock o no. Existe una noción de *liveness* análoga a aquella de los sistemas informáticos.

Existen varios verificadores de modelos de última generación e incluso existe un Model Checking Contest que se celebra todos los años. Las herramientas más avanzadas pueden manejar modelos de redes de Petri con más de **70 000 transiciones** y **un millón de lugares**.

Traducir el código fuente a una red de Petri se ha hecho antes para otros lenguajes de programación [19, 20] y también para Rust [21, 22]. La dificultad reside en soportar más primitivas de sincronización que solo mutexes y traducir código de aplicaciones del mundo real.

Agenda

Etapas de compilación en *rustc*

- Lexing: El código fuente se convierte en un flujo de unidades atómicas conocidas como tokens.

Etapas de compilación en *rustc*

- Lexing: El código fuente se convierte en un flujo de unidades atómicas conocidas como tokens.
- Parsing: El flujo de tokens se convierte en un **Abstract Syntax Tree**

Etapas de compilación en *rustc*

- Lexing: El código fuente se convierte en un flujo de unidades atómicas conocidas como tokens.
- Parsing: El flujo de tokens se convierte en un **Abstract Syntax Tree**
- High-level Intermediate Representation (HIR):
  - Desugar loops: `while` y `for` a simples `loop`
  - Type inference: Detección automática del tipo de una expresión
  - Trait solving: Asegurarse que cada bloque (`impl`) apunta a un trait válido
  - Chequeo de tipos

Etapas de compilación en *rustc*

- Lexing: El código fuente se convierte en un flujo de unidades atómicas conocidas como tokens.
- Parsing: El flujo de tokens se convierte en un **Abstract Syntax Tree**
- High-level Intermediate Representation (HIR):
  - Desugar loops: `while` y `for` a simples `loop`
  - Type inference: Detección automática del tipo de una expresión
  - Trait solving: Asegurarse que cada bloque (`impl`) apunta a un trait válido
  - Chequeo de tipos
- Mid-level Intermediate Representation (MIR):
  - Chequeo exhaustivo del *pattern matching*
  - Desugar method calls to function calls: `x.method(y)` se convierte en `Type::method(&x, y)`
  - Add implicit dereferencing operations
  - Borrow checking

Etapas de compilación en *rustc*

- Lexing: El código fuente se convierte en un flujo de unidades atómicas conocidas como tokens.
- Parsing: El flujo de tokens se convierte en un **Abstract Syntax Tree**
- High-level Intermediate Representation (HIR):
  - Desugar loops: `while` y `for` a simples `loop`
  - Type inference: Detección automática del tipo de una expresión
  - Trait solving: Asegurarse que cada bloque (`impl`) apunta a un trait válido
  - Chequeo de tipos
- Mid-level Intermediate Representation (MIR):
  - Chequeo exhaustivo del *pattern matching*
  - Desugar method calls to function calls: `x.method(y)` se convierte en `Type::method(&x, y)`
  - Add implicit dereferencing operations
  - Borrow checking
- Code generation:
  - *rustc* se apoya en LLVM como backend
  - Aprovecha muchas optimizaciones de la representación intermedia de LLVM
  - LLVM toma el relevo a partir de este momento
  - Al final, los archivos objeto se enlazan para crear un ejecutable

Agenda

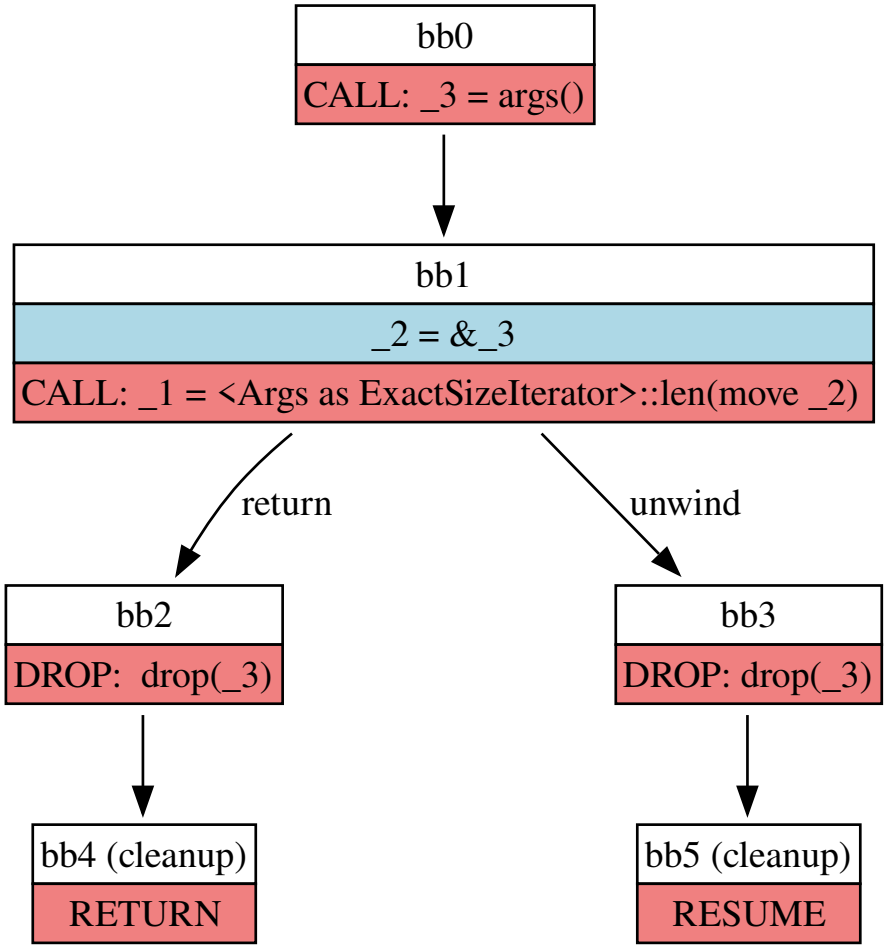
Hello World in MIR

BB significa “basic block”. Cada uno está formado por sentencias (*statements*) y una sentencia terminadora. La sentencia terminadora es el único lugar donde el flujo de control puede saltar a otro bloque básico.

```
1  fn main() -> () {
2      let mut _0: ();
3      let _1: ();
4      let mut _2: std::fmt::Arguments<'_>;
5      let mut _3: &[&str];
6      let mut _4: &[&str; 1];
7
8      bb0: {
9          _4 = const _;
10         _3 = _4 as &[&str] (Pointer(Unsize));
11         _2 = Arguments::<'_>::new_const(move _3) -> bb1;
12     }
13
14     bb1: {
15         _1 = _print(move _2) -> bb2;
16     }
17
18     bb2: {
19         return;
20     }
21 }
```

MIR como un grafo que muestra el flujo de ejecución

El MIR es un *control flow graph* (CFG) utilizado en compiladores. En esta representación, la traducción a una red de Petri se hace evidente.



Agenda

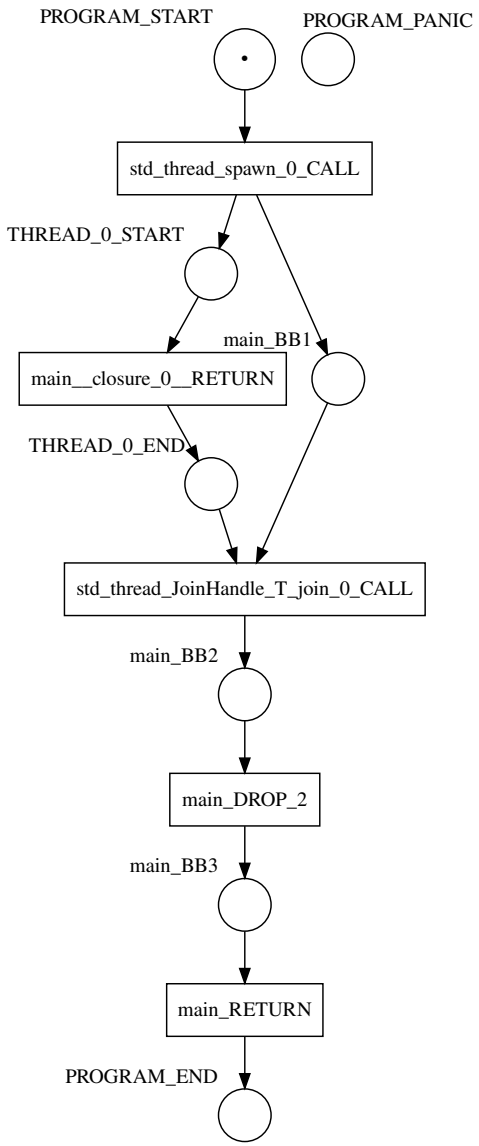
Programa de ejemplo

Consideremos un programa trivial que inicia un hilo que no hace nada e inmediatamente se une a él.

```
1  fn main() {
2      let thread_join_handle = std::thread::spawn(move || {
3          // some work here
4      });
5      // some work here
6      let _res = thread_join_handle.join();
7  }
```

- `std::thread::spawn` debe crear un token adicional que modele el *program counter* del segundo hilo
- El hilo que llama a *join* debe esperar a que el otro hilo termine

Modelo de red de Petri de un hilo de ejecución



Agenda

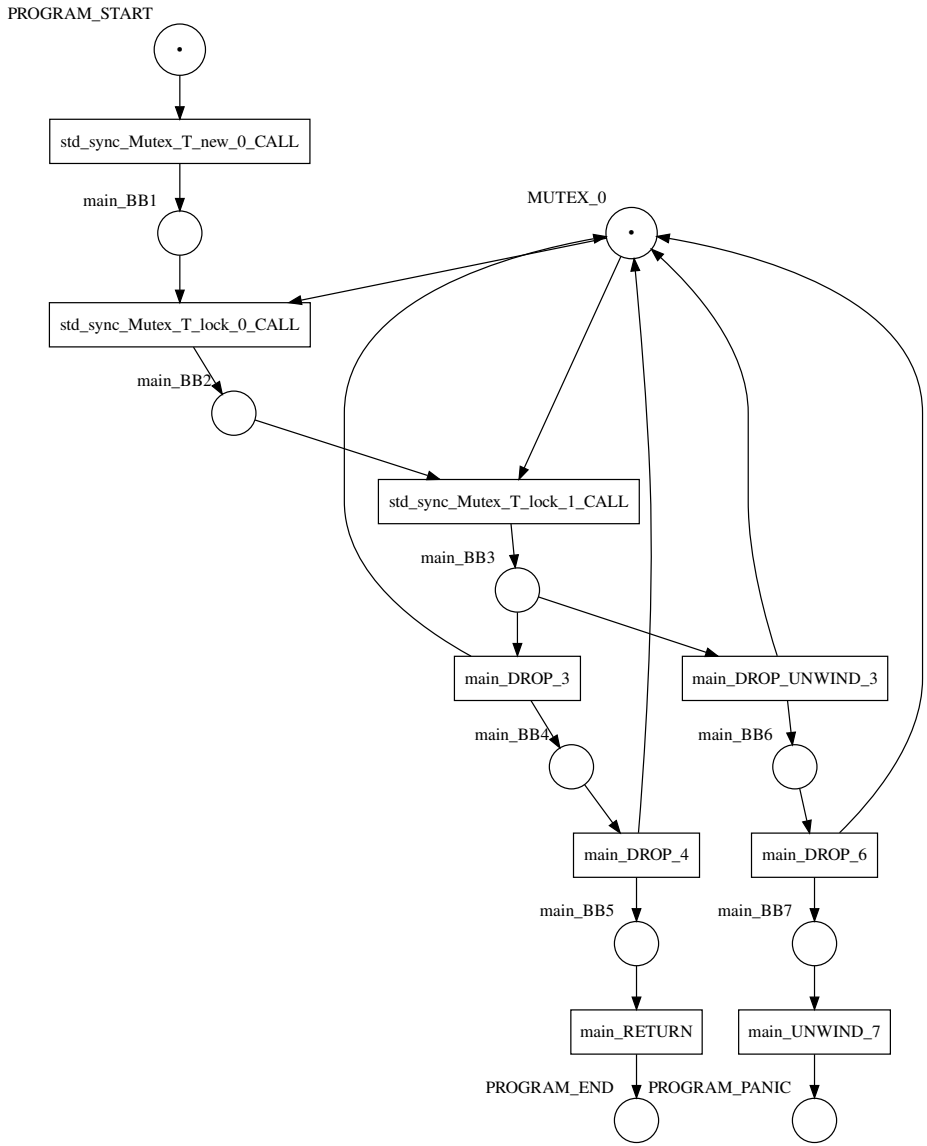
Programa de ejemplo

Consideremos un programa simple que llama a *lock* sobre un mutex dos veces. La segunda operación de *lock* causará un deadlock porque el *lock handle* devuelto por la primera llamada a `Mutex::lock` no se libera hasta que sale de scope.

```
1  fn main() {
2      let data = std::sync::Mutex::new(0);
3      let _d1 = data.lock();
4      let _d2 = data.lock(); // cannot lock, since d1 is still active
5  }
```

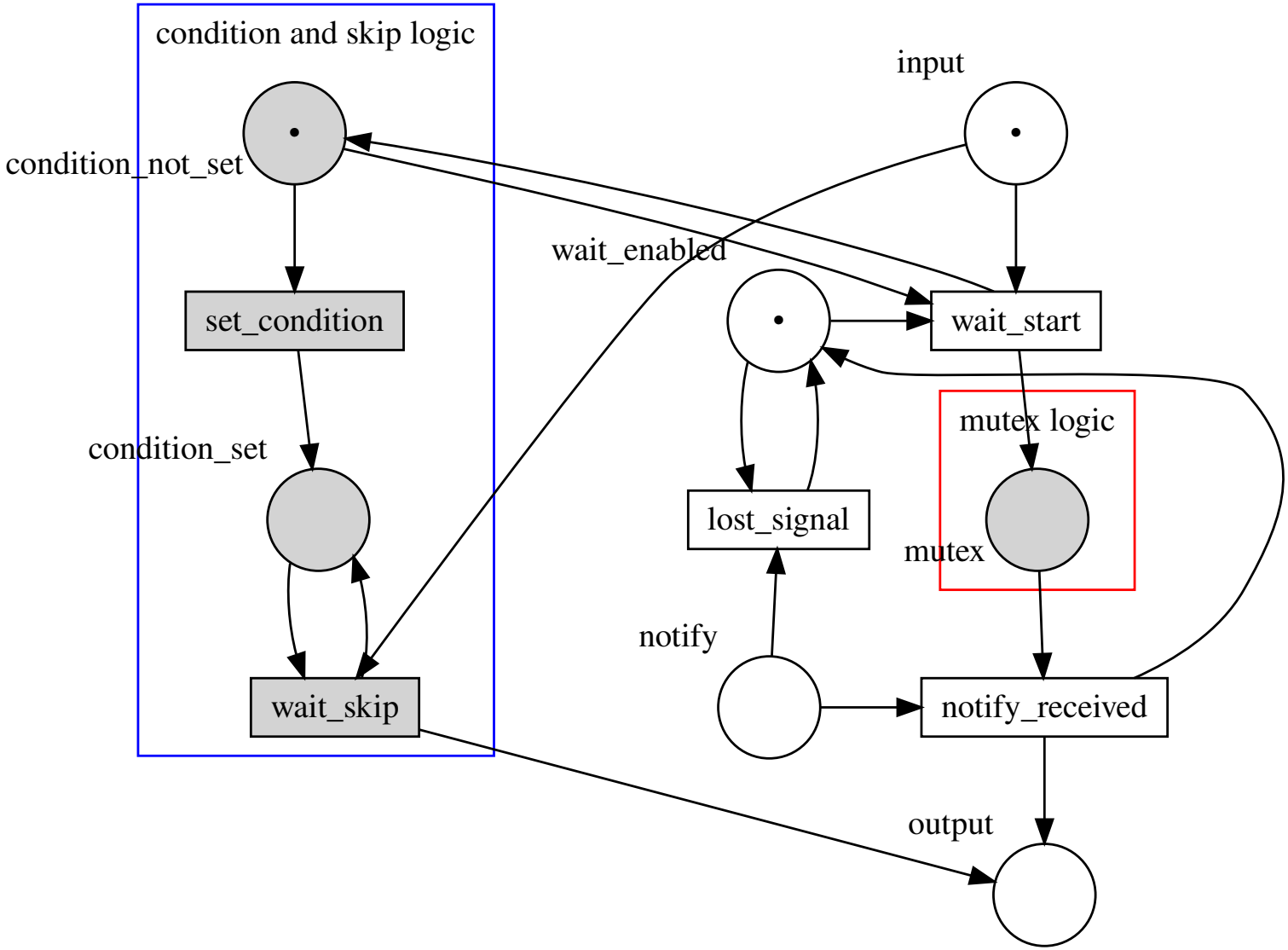
- Debería haber un único lugar que modele el mutex
- Bloquear el mutex es sacar el token del lugar del mutex
- Desbloquear el mutex es volver a colocar el token en el lugar del mutex

Modelo de red de Petri de un mutex



Agenda

Cómo modelar una *condition variable*



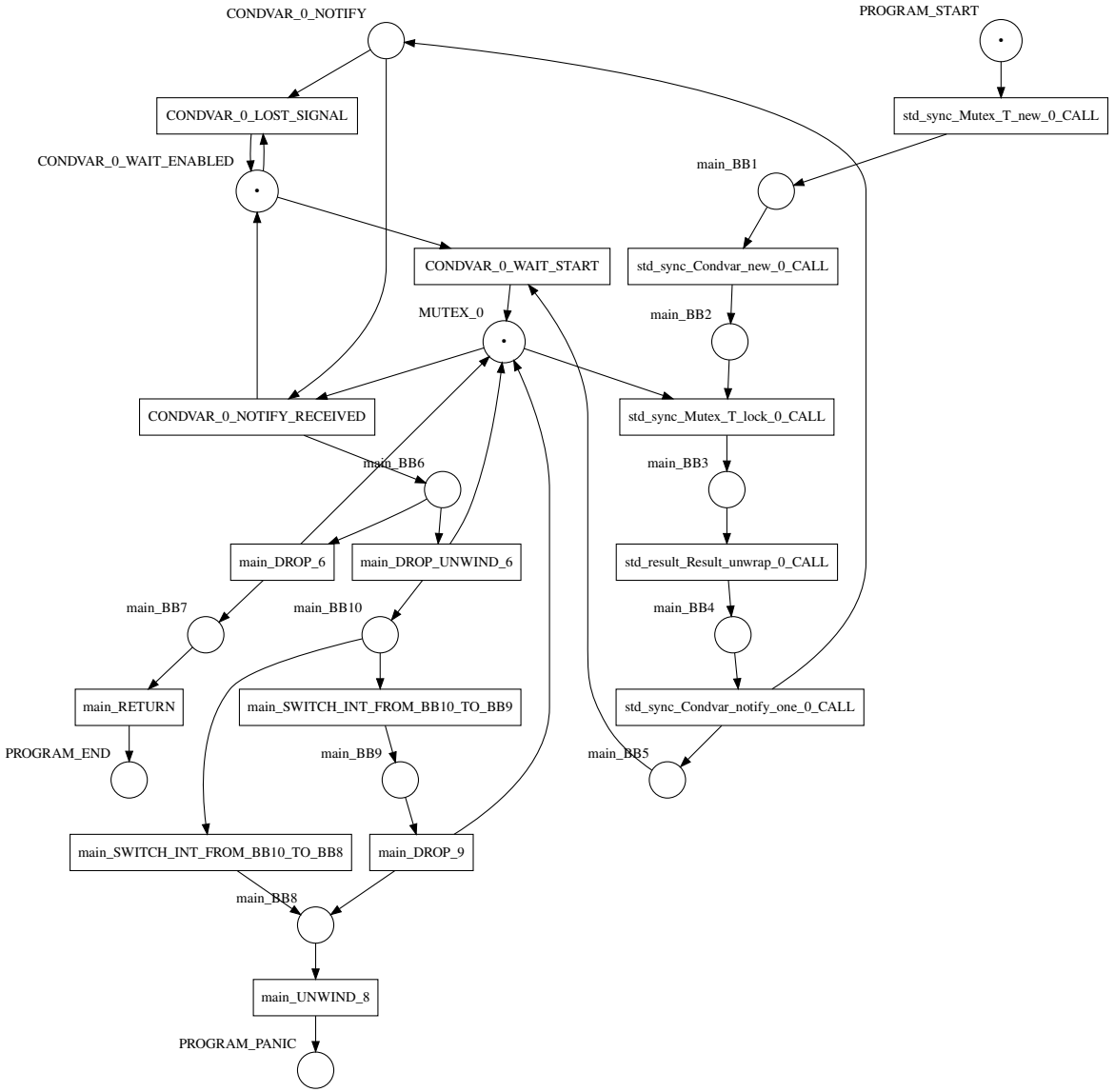
Programa de ejemplo

Tenemos que utilizar un programa de ejemplo muy simple para mantener la red pequeña. En este caso, el hilo está tratando de notificarse a sí mismo, lo que conduce a una señal perdida.

```
1  fn main() {
2    let mutex = std::sync::Mutex::new(false);
3    let cvar = std::sync::Condvar::new();
4    let mutex_guard = mutex.lock().unwrap();
5    cvar.notify_one();
6    let _result = cvar.wait(mutex_guard);
7  }
```

- El modelo para la variable de condición debe aparecer en la red de Petri
- Se coloca un token en el lugar de notificación
- La señal se consume porque no se ha llamado a `Condvar::wait`

Modelo de red de Petri para el programa de ejemplo



Agenda

Bibliografía I


E. Stepanov, “Detecting Memory Corruption Bugs With HWASan.” https://android-developers.googleblog.com/2020/02/detecting-memory-corruption-bugs-with-hwasan.html, 2020.
Accessed on 2023-02-24.


J. V. Stoep and C. Zhang, “Queue the Hardening Enhancements.” https://android-developers.googleblog.com/2020/02/detecting-memory-corruption-bugs-with-hwasan.html, 2020.
Accessed on 2023-02-24.


The Chromium Projects, “Memory safety.”
https://www.chromium.org/Home/chromium-security/memory-safety/, 2015.
Accessed on 2023-02-24.


D. Hosfelt, “Implications of Rewriting a Browser Component in Rust.”
https://hacks.mozilla.org/2019/02/rewriting-a-browser-component-in-rust/, 2019.
Accessed on 2023-02-24.


P. Kehrer, “Memory Unsafety in Apple’s Operating Systems.”
https://langui.sh/2019/07/23/apple-memory-safety/, 2019.
Accessed on 2023-02-24.


M. Miller, “Trends, Challenges, and Strategic Shifts in the Software Vulnerability Mitigation Landscape.”
https://www.youtube.com/watch?v=PjbGojjnBZQ, 2019.
Accessed on 2023-02-24.


S. Fernandez, “A proactive approach to more secure code.”
https://msrc.microsoft.com/blog/2019/07/a-proactive-approach-to-more-secure-code/, 2019.
Accessed on 2023-02-24.

Bibliografía II


A. Gaynor, "What science can tell us about C and C++'s security." https://alexgaynor.net/2020/may/27/science-on-memory-unsafety-and-security/, 2020.
Accessed on 2023-02-24.


J. V. Stoep and S. Hines, "Rust in the Android platform." https://security.googleblog.com/2021/04/rust-in-android-platform.html, 2021.
Accessed on 2023-02-22.


J. Corbet, "The 6.1 kernel is out." https://lwn.net/Articles/917504/, 2022.
Accessed on 2023-02-24.


S. D. Simone, "Linux 6.1 Officially Adds Support for Rust in the Kernel." https://www.infoq.com/news/2022/12/linux-6-1-rust/, 2022.
Accessed on 2023-02-24.


Mozilla Wiki, "Oxidation Project." https://wiki.mozilla.org/Oxidation, 2015.
Accessed on 2023-03-20.


E. Garcia, "Programming languages endorsed for server-side use at Meta." https://engineering.fb.com/2022/07/27/developer-tools/programming-languages-endorsed-for-server-side-use-at-meta/, 2022.
Accessed on 2023-02-24.


Y. Wu and A. Hauck, "How we built Pingora, the proxy that connects Cloudflare to the Internet." https://blog.cloudflare.com/how-we-built-pingora-the-proxy-that-connects-cloudflare-to-the-internet/, 2022.
Accessed on 2023-03-20.

Bibliografía III


J. Howarth, “Why Discord is switching from Go to Rust.”
https://discord.com/blog/why-discord-is-switching-from-go-to-rust, 2020.
Accessed on 2023-03-20.


The Rust Project Developers, “Rust case study: Community makes rust an easy choice for npm,” 2019.
https://www.rust-lang.org/static/pdfs/Rust-npm-Whitepaper.pdf.


R. Pereira, M. Couto, F. Ribeiro, R. Rua, J. Cunha, J. P. Fernandes, and J. Saraiva, “Energy efficiency across programming languages: how do energy, time, and memory relate?,” in *Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN international conference on software language engineering*, pp. 256–267, 2017.


P. Albini, “RustFest Barcelona - Shipping a stable compiler every six weeks.”
https://www.youtube.com/watch?v=As1gXp5kX1M, 2019.
Accessed on 2023-02-24.


K. M. Kavi, A. Moshtaghi, and D.-J. Chen, “Modeling multithreaded applications using petri nets,” *International Journal of Parallel Programming*, vol. 30, pp. 353–371, 2002.


A. Moshtaghi, “Modeling Multithreaded Applications Using Petri Nets,” Master’s thesis, The University of Alabama in Huntsville, 2001.


T. Meyer, “A Petri Net semantics for Rust,” Master’s thesis, Universität Rostock — Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, 2020.
https://github.com/Skasselbard/Granite/blob/master/doc/MasterThesis/main.pdf.


K. Zhang and G. Liua, “Automatically transform rust source to petri nets for checking deadlocks,” *arXiv preprint arXiv:2212.02754*, 2022.

Agenda

Recursos para aprender Rust

- The Rust Book: Disponible en línea y localmente con la instalación por defecto de Rust
- Rust by Example: Otro libro oficial con un enfoque más práctico
- Rustlings: Pequeños ejercicios para acostumbrarse a leer y escribir código Rust
- Comprehensive Rust: Un curso de Rust en tres días desarrollado por el equipo de Android
- Take your first steps with Rust: Un curso sencillo en Microsoft Learn
- Rust Programming Course for Beginners by freeCodeCamp.org

Simuladores en línea de redes de Petri

- Un simulador sencillo construido por Igor Kim en https://petri.hp102.ru/. La herramienta incluye un vídeo tutorial en Youtube y redes de ejemplo.
- Como complemento, una serie de tutoriales interactivos a cargo del profesor Wil van der Aalst de la Universidad de Hamburgo. Estos tutoriales son archivos de Adobe Flash Player (con extensión `.swf`) que los navegadores web modernos no pueden ejecutar. Por suerte, un emulador de Flash en línea como el que se encuentra en https://flashplayer.fullstacks.net/?kind=Flash_Emulator se puede usar para cargar los archivos y ejecutarlos.
- Otro editor y simulador de redes de Petri en línea es http://www.biregal.com/. El usuario puede dibujar la red, añadir los tokens y, a continuación, disparar manualmente las transiciones.

¿Preguntas?

Links

Tesis	https://github.com/hlisdero/thesis
Herramienta	https://github.com/hlisdero/cargo-check-deadlock
Presentación	https://github.com/hlisdero/thesis/tree/main/presentation_es
Crate publicado	https://crates.io/crates/cargo-check-deadlock