

# Modelamiento de la compraventa de inmuebles nuevos en el sector inmobiliario mediante un contrato inteligente usando Redes de Petri

Tania Cardozo<sup>1</sup>, Edgar Céspedes<sup>2</sup>, Carlos Quiroz<sup>3</sup> \*\*\*\*

## Resumen

*En los últimos años las tecnologías disruptivas se han convertido en un reto para todos los sectores de la economía y suponen un cambio de paradigma sobre la dinámica de estos y la relación entre sus diferentes actores. La revolución tecnológica abre el camino a la implementación de nuevas técnicas y metodologías para garantizar eficiencia en las operaciones comerciales y acceso eficiente a la información. Algunos términos como Bitcoin, Blockchain, criptomonedas, contratos inteligentes, entre otros, están siendo usados con frecuencia en la última década pero la claridad sobre su significado formal no está del todo definido para las personas. Se subestima el impacto, el uso y el reto que se avecina para la sociedad en general en la dinámica económica y social. En particular, en este artículo se busca modelar la operación de compraventa de apartamentos nuevos del sector inmobiliario bajo una configuración de contrato inteligente soportado en la Blockchain de Ethereum. La dinámica se modela a través del uso de una herramienta de modelado denominada Redes de Petri.*

**Key words**— Blockchain, Contrato Inteligente, Red de Petri, Sector Inmobiliario

## 1. INTRODUCCIÓN

La dinámica de la economía de un país impacta los aspectos de los sectores económicos como el sector inmobiliario, el cual juega un papel importante debido al comportamiento del mercado de vivienda. Dentro de este sector económico se pueden encontrar diferentes operaciones entre las que cabe resaltar la compraventa de inmuebles nuevos. En particular esta operación económica implica la interacción de dos actores o agentes económicos: inversionistas (en adelante constructora) y compradores (en adelante

clientes). La dinámica del sector inmobiliario está dada inicialmente por la inyección de capital por parte de las constructoras para ofrecer proyectos nuevos de vivienda, y posteriormente por la decisión de compra de los clientes, en donde se genera el pago del inmueble y de esta manera la constructora recupera la inversión inicial realizada.

Estas operaciones comerciales en el sector inmobiliario son objeto de análisis para el presente proyecto, y por tal razón se puede evidenciar que existen varias herramientas que permiten analizar estas dinámicas según las necesidades e intereses del analista. Dentro de los modelos que podrían utilizarse para analizar la dinámica mencionada se puede seleccionar las Redes de Petri. De esta manera, en el presente artículo se busca modelar esta dinámica con el objetivo de determinar la cantidad de transacciones estimada que podría llegar a tener un contrato inteligente que administra el recaudo del proyecto inmobiliario en su fase de planos y construcción. Con base en este volumen transaccional, se estima el costo de administrar los recursos económicos captados por el proyecto usando un contrato inteligente (smart contract) soportado en la plataforma la blockchain de Ethereum.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

Realizando una revisión de la literatura relacionada con contratos inteligentes y redes de Petri, se puede observar que se han trabajado en su mayoría de manera independiente. Existe literatura relacionada con el uso de redes de Petri para modelar las transacciones de bitcoin ocurridas en Blockchain, así como trabajos relacionados con contratos inteligentes. Por ejemplo, en [1] se analizan las implicaciones e inconvenientes que puede tener un contrato inteligente en el ámbito legal aplicado al derecho civil. Igualmente se plantea el problema de la privacidad en transacciones con Blockchain para contratos inteligentes al igual que se muestra una herramienta tecnológica que puede ayudar a mitigar este problema [2]. En [3] se explica el funcionamiento general de Blockchain donde

<sup>1</sup> Universidad de los Andes

<sup>2</sup> Universidad de los Andes

<sup>3</sup> Universidad de los Andes

se enfatiza que no se debe confundir Bitcoin con Blockchain, debido a que Bitcoin es solo una de las diferentes aplicaciones que puede soportar Blockchain. Así se puede concluir que blockchain puede soportar otras aplicaciones como contratos inteligentes. Pinna A. habla en [4] sobre el uso e identificación de direcciones desechables para cuidar el anonimato de direcciones de usuarios de Blockchain específicamente en el contexto de Bitcoin usando Redes de Petri. También se resalta la utilidad que representa usar Redes de Petri para modelar el comportamiento de operaciones comerciales donde es necesario un proceso de validación de requisitos [5]. De igual manera se describe en [6] de manera más puntual como las Redes de Petri se pueden usar para modelar el sistema Blockchain, pero aplicado directamente en el contexto de Bitcoin. Finalmente, en [7] se describe la sensibilidad de un proceso automatizado de negociación en cuanto a la verificación de información y confianza entre las partes involucradas en términos de los contratos inteligentes. De esta manera la integración de redes de Petri con Blockchain aplicado al sector inmobiliario corresponde a un reto del presente artículo.

### 3. CONTEXTO

A continuación se presenta de manera general algunas consideraciones a tener en cuenta para la comprensión del modelo desarrollado. En general, se introducirá información relacionada con el sector inmobiliario colombiano, el uso de contratos inteligentes y la blockchain de Ethereum.

#### 3.1. Sobre el sector inmobiliario colombiano

El alcance del presente artículo considera únicamente la compraventa de proyectos nuevos de vivienda. En general, una constructora realiza el lanzamiento de un proyecto inmobiliario de construcción de vivienda, tras haberse sometido a un proceso de planeación y haber reunido los requisitos legales para su construcción. Una vez la constructora toma la decisión de realizar el lanzamiento de un proyecto, inicia la fase de venta de inmuebles sobre planos. En esta fase los inmuebles aún no han sido construidos y por esta razón, los precios de venta son más bajos respecto al precio final de venta cuando ya se materialice la construcción. Lo anterior con el fin de incentivar la dinámica de compra con un precio atractivo y de esta manera capitalizar el proyecto para iniciar su construcción.

Durante la fase de planos, cuando un cliente está interesado en adquirir el inmueble, la constructora

establece un acuerdo de pago del valor de la cuota inicial del inmueble por parte del cliente. Este monto inicial está aproximadamente entre el 30 % y 40 % del valor total del inmueble. El acuerdo consiste en un pago inicial para separar el inmueble y en pagos mensuales hasta la entrega del inmueble. Dado que los clientes hacen los acuerdos de pago en diferentes momentos del horizonte del proyecto, la cantidad de cuotas y su valor difieren dependiendo del tiempo faltante hasta la entrega del inmueble.

Para regular el acuerdo, la constructora y los clientes establecen un contrato. En dicho documento, la constructora se compromete a entregar la vivienda en las condiciones ofrecidas y el cliente a realizar los pagos mensuales acordados. También en el contrato se establecen las acciones que se deberían cumplir frente a un incumplimiento por las partes. Por ejemplo, en caso de que la constructora no logre reunir la cantidad de dinero suficiente para aprobar la construcción del proyecto, el proyecto de vivienda se cancela y se debe devolver la totalidad del dinero a sus clientes. Por otro lado, en caso de que el cliente se retrase en 3 cuotas consecutivas, la constructora libera el inmueble dejándolo disponible para la oferta y le devuelve al cliente únicamente una parte del dinero que ha pagado (aproximadamente un 40 %). En algunos casos, las constructoras incluyen en el acuerdo un agente fiduciario que genera las garantías a los clientes en la compra de vivienda en la fase sobre planos y condiciona con dicha entidad la construcción del proyecto hasta que se logre el punto de equilibrio financiero dentro un plazo establecido. Así finalmente cuando se logra el punto de equilibrio al final del plazo establecido de oferta en planos, el dinero recaudado es transferido a la constructora para iniciar con la construcción de los inmuebles.

#### 3.2. Sobre Redes de Petri

Las Redes de Petri son un lenguaje matemático muy útil para modelar múltiples fenómenos, en especial dentro del área de la ingeniería. Son una potente extensión de los grafos de estados que proporcionan una representación más compacta y efectiva de los sistemas concurrentes, con evoluciones paralelas y sincronizaciones. Su interpretación gráfica y matemática las hacen particularmente interesantes para tratar sistemas complejos [7].

Una Red de Petri es un grafo bipartito directo con dos tipos de nodos, places representados por círculos y transiciones representadas por rectángulos. Los arcos que se representan por flechas unen consecutivamente un lugar con una transición o viceversa, solo pueden

estar unidas un place con una transición, pero no un place con un place o una transición con una transición. Los places tienen un número de tokens representados por puntos y a este conjunto de puntos se le conoce como marking del place. El marking evoluciona por el disparo de las transiciones, debido a la ocurrencia de eventos asociados. Los places pueden ser interpretados como variables de estado [7].

### 3.3. Sobre Contratos Inteligentes

Un contrato inteligente corresponde a un algoritmo que contiene las condiciones del contrato y se ejecuta de manera automática cuando se cumplen estas condiciones estipuladas. Es por esto que para el contrato de compra de vivienda sobre planos se hace viable crear un contrato inteligente que ofrezca las garantías y regule las obligaciones por cada una de las partes involucradas (constructora y clientes). Estos contratos facilitan el cumplimiento de las obligaciones asumidas entre dos partes en el término de un contrato. Adicionalmente estos contratos implican la posibilidad de eliminar intermediarios y recursos físicos actualmente necesarios; incluso ventajas como la disponibilidad inmediata de la información correspondiente a las transacciones, dado que la información de todas las transacciones llevadas a cabo quedan registradas en la Blockchain de manera inmodificable.

### 3.4. Sobre Blockchain

El sistema electrónico de dinero Bitcoin ideado por Satoshi Nakamoto, propone un sistema que permite enviar pagos de una parte a otra sin necesidad de intervención de instituciones financieras que lo validen. Esta propuesta genera una solución al problema de doble gasto con bloques de transacciones que están encadenadas mediante una serie de hashes entre ellas como se observa en la figura 1. Cada nuevo bloque de transacciones de dinero entre cuentas *TxRoot* se incluye el hash del bloque anterior *PrevHash* y también se hasha. Una modificación de datos al interior de un bloque previamente creado cambia su hash y ya no coincidiría con el hash registrado en el siguiente bloque. Así, cada transacción queda registrada y no hay posibilidad de hacer cambios. El sistema de bloques no está centralizado sino distribuido, es decir, un sistema de nodos comparten copias del registro de bloques encadenadas (blockchain) y con ello los cambios generados sobre uno de los registros en un nodo en particular no es validado por las copias de los registros de los otros nodos y por tanto no sería válido para la

red. De esta manera, se garantiza la no vulnerabilidad de la red.

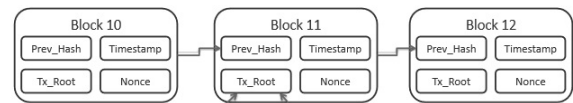


Figura 1. Red de Bitcoin. Fuente: Wikipedia

### 3.5. Sobre Contratos Inteligentes en Ethereum

En su primera versión, la moneda bitcoin y su sistema de registro de cadenas de bloques (blockchain) permiten hacer transferencias de dinero entre diferentes cuentas (personas o empresas) mediante el uso de aplicaciones llamadas *wallets*. Una segunda versión [8] creó Ethereum, una blockchain que además de hacer transferencias entre cuentas, también permite crear aplicaciones bajo dicho entorno, es decir, dispone de un entorno de programación para la elaboración de acuerdos automáticos relacionados con transacciones. Estos acuerdos son regularmente llamados *contratos inteligentes* (*smartcontract*).

Los contratos inteligentes son regularmente usados para garantizar acuerdos con otras personas dentro de la plataforma blockchain. Estos acuerdos son por ejemplo, compra y venta de bienes digitales, arrendamiento o alquiler de un producto físico o un sistema de votaciones electrónicas. A nivel general, para implementar un contrato se deben programar funciones (*functions*) con instrucciones específicas. Cuando el contrato se compila en el sistema de Ethereum (EVM), este asigna una dirección única (similar a la del usuario) y mediante interfaces de las aplicaciones (*wallets*), se puede hacer uso de las funciones de dicho contrato. Tanto la compilación del contrato como el uso de sus funciones se consideran transacciones dentro de la blockchain y por tanto se asignarán a los bloques a medida que se ejecuten.

Tanto el sistema de bitcoins como el de Ethereum tienen programas de recompensa para que los usuarios de internet hagan parte de los nodos del sistema y presten sus capacidades de cómputo para generar el hash de los bloques y se respalde la información de la blockchain. El costo de cada transacción es asumida por el usuario y varía dependiendo de la rapidez con que se requiere hacer efectiva. Si la transacción está relacionada con una ejecución de una función de un *smartcontract*, su costo dependerá de la complejidad computacional de dicha función.

## 4. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta el objetivo del presente artículo, se realiza el modelamiento de la dinámica de compraventa de inmuebles nuevos en el sector inmobiliario a través de Redes de Petri[6]. Posteriormente, se implementa un contrato inteligente en la blockchain de Ethereum con el fin de calcular los costos transaccionales de la operación.

La dinámica a representar en términos generales, implica que las constructoras lanzan al mercado con cierta frecuencia proyectos nuevos de vivienda para ser adquirida durante el horizonte del proyecto, en donde el cliente puede interesarse por adquirir el inmueble en el tiempo de oferta sobre planos o en el tiempo de oferta en construcción. Según las necesidades de la constructora se define un tiempo de oferta de dichos proyectos, y en caso de existir un cliente interesado se puede iniciar una relación comercial temporal en donde el interesado debe cancelar un porcentaje del costo total del proyecto (*cuotainicial*), el cual debe quedar saldado al momento de la entrega del inmueble.

El plazo máximo fijado por la constructora para alcanzar el punto de equilibrio esta dado por el tiempo de oferta sobre planos. En el caso de que la constructora no alcance su punto de equilibrio (con un mínimo de proyectos vendidos), el proyecto no se realiza y es necesario reembolsar o devolver el dinero recaudado hasta el momento para cada uno de los clientes. Si el proyecto decide empezar a construirse, cada cliente debe continuar con el acuerdo de pago establecido.

### 4.1. MODELO DE RED DE PETRI

Se representa la dinámica de la compraventa de inmuebles nuevos por parte de un cliente a una constructora. Inicia desde el lanzamiento del proyecto inmobiliario hasta la entrega del inmueble construido al cliente tras la cancelación de la cuota inicial de la vivienda. El modelo de Red de Petri fue desarrollado en *Mobius* y contiene la siguiente estructura general:

#### ■ Modelo de Cliente

Este modelo representa el estado de pagos mensuales que debe hacer el cliente desde el momento en que realiza la separación hasta la fecha estimada de entrega de la vivienda. En esta red se van contabilizando los pagos realizados y en caso de incumplimiento de pagos, se modela la devolución parcial del dinero. Para modelar la incertidumbre en el pago mensual, se incorporan variables relacionadas con las probabilidades de incumplimiento del pago para la primera, segunda y tercera cuota mensual consecutiva.

#### ■ Modelo Proyecto Inmobiliario

Este modelo representa el estado del proyecto inmobiliario, el cual posee cambios cuando ocurre la asignación de inmuebles al momento de la separación por parte de un cliente o cuando se ejecuta la liberación de esta (vuelve a quedar disponible) al momento de incumplir con sus pagos. Además, una vez finaliza el tiempo de oferta sobre planos se verifica si se cumplió el porcentaje de punto de equilibrio para permitir la ejecución de la fase de construcción.

#### ■ Modelo integrado

El modelo cliente se ejecuta para separar uno de los inmuebles disponibles en el modelo proyecto inmobiliario. El modelo de cliente se replica 300 de veces para representar la separación y compra de cada inmueble disponible. Cuando en el modelo cliente se incumplen los pagos, este libera la vivienda separada al modelo proyecto para que pueda ser usado por otro modelo cliente.

## 4.2. Estructura de Modelo de Cliente

### ■ PLACES

**PersInteresada:** Un token en este place representa un potencial cliente interesado en un apartamento.

**Cliente:** Un token en este place representa que un potencial cliente efectivamente está interesado previa verificación de la disponibilidad de apartamentos.

**CanCuotas:** En este place el número de tokens luego de la transición correspondiente indica el número de cuotas totales que debe pagar el interesado para cubrir la cuota inicial. Este número de cuotas depende del momento en el cual el cliente se adhiere al proyecto. De esta manera, si el cliente está muy próximo a la terminación del periodo de oferta por parte de la constructora la cantidad de cuotas sera menor, pero con un valor de mayor cuantía.

**CuotaPen:** Cuando el cliente empieza su plan de pago existe la posibilidad de que incumpla alguna de sus cuotas, cada token dentro de este place representa una cuota no pagada. Según el modelo al incumplir con tres cuotas consecutivas se disuelve el negocio con el cliente, por lo tanto, en este place máximo se pueden encontrar 3 tokens.

**Cuotas Pagadas:** Un token en este place representa una cuota pagada, si el cliente cumple todas sus cuotas al final los tokens en este place serán iguales a CanCuotas.

**Pagos:** Cumple un papel similar al place CuotasPagadas, se usa como auxiliar.

**Capital:** Un token en este place representa una cuota monetaria que el cliente ha pagado.

**Ind1pagos:** Captura el numero de transacciones de pago.

**Incumplimiento:** Un token en este place representa que el cliente ha incumplido 3 cuotas consecutivas y por lo tanto el negocio con la constructora se anula.

**Devueltos:** Un token en este place representa que un negocio se ha anulado y por lo tanto ahora hay un apartamento disponible para ofertar nuevamente.

## ■ PLACES EXTENDIDOS

**EP1:** En este place se almacenan 3 tipos de datos bajo una estructura de datos:

- *Tiempo de ejecución:* Horizonte del proyecto: 24 meses
- *CanApartamentos:* Este valor corresponde al número total de apartamentos nuevos de los que se conforma el proyecto.
- *CuotaInicial:* Este es el valor de cuota inicial que debe cancelar un cliente para realizar la entrega del apartamento (teniendo en cuenta que el valor restante del apartamento no se incluye en el análisis).

**EP2:** Sirve para caracterizar a un cliente con una probabilidad de que se atrase en sus cuotas, ya sea 1 cuota, 2 cuotas o 3 cuotas.

**EP3:** Tiene en cuenta las cuotas pendientes o atrasadas que tiene un cliente.

**EP4:** Como el valor de las cuotas depende del tiempo en que el cliente se adhiera al proyecto, es necesario recalcular el valor de la cuota inicial si el proyecto ya no está en el periodo normal de oferta.

## ■ TRANSICIONES TEMPORIZADAS

**ProLlegada:** Indica la llegada de un cliente interesado que puede adquirir un apartamento. Su comportamiento sigue una distribución exponencial, teniendo en cuenta la alta demanda de clientes en el sector inmobiliario al inicio del proyecto (tiempo entre planos).

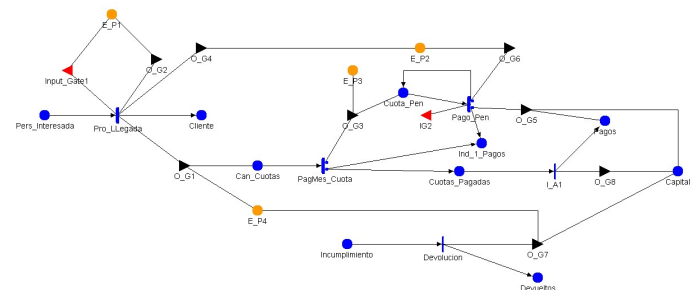
**PagMesCuota:** Esta transición temporal tiene un tiempo determinístico que corresponde a 1 mes, donde al final de este mes se sabe si el cliente efectivamente pagó la cuota correspondiente o si la cuota queda pendiente de pago (2 casos).

**PagoPen:** Análogo a la transición anterior, sirve para indicar si al final de un mes se paga una cuota que ya está vencida.

## ■ TRANSICIONES INSTANTÁNEAS

**IA1:** Permite de forma auxiliar convertir una cuota pagada en un pago efectivo y en el respectivo capital.

**Devolución:** Luego de un incumplimiento permite actualizar los apartamentos devueltos, así como actualizar el capital por la devolución.



**Figura 2. Modelo de Cliente. Fuente: Autores**

## 4.3. Estructura de Modelo de Proyecto Inmobiliario

### ■ PLACES

**TempProyectoCONST:** Los tokens en este place representan los meses totales que tomará la construcción del proyecto desde el diseño.

**TempProyectoPlanos:** Los tokens en este place representan el periodo en el cuál el proyecto se oferta sobre planos.

**DisePro:** Un token en este place representa que hay un proyecto diseñado disponible que puede ofertarse en el mercado.

**CanApartamentos2:** Cuando el cliente empieza su plan de pago existe la posibilidad de que incumpla alguna de sus cuotas, cada token dentro de este place representa una cuota no pagada. Según el modelo al incumplir con tres cuotas se disuelve el negocio con el cliente, por lo tanto, en este place máximo se pueden encontrar 3 tokens.

**Cliente:** Es el mismo place que se definió en el modelo de comportamiento del cliente. Es un place compartido

**Apapartados:** Un token en este place representa el número de apartamentos que se han apartado del total que ofrece el proyecto.

**ProyectoAprobado:** Si hay un token (cantidad mayor a cero) implica que se apartaron el número de apartamentos necesarios para que la constructora alcance el punto de equilibrio e inicie la construcción del proyecto.

**CanVendidos:** Un token en este place indica un apartamento vendido.

#### ■ PLACES EXTENDIDOS

**EP1:** Es el mismo place que se definió en el modelo de comportamiento del cliente. Es un place compartido

**Apartados:** En un auxiliar que funciona similar al place Apapartados.

#### ■ TRANSICIONES TEMPORIZADAS

**TasaProCons:** Indica el tiempo en que una constructora saca proyectos nuevos al mercado. Su comportamiento es determinístico con valor de un mes.

**Mes:** Auxiliar para manejar el tiempo, donde cada mes se activa y quita un token del place correspondiente.

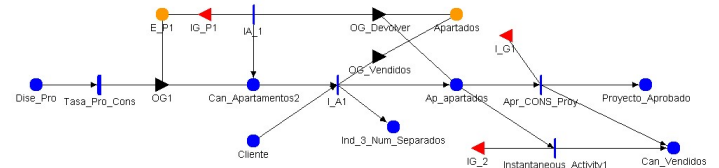
**Mes2:** Auxiliar para manejar el tiempo, donde cada mes se activa y quita un token del place correspondiente.

#### ■ TRANSICIONES INSTANTÁNEAS

**IA1:** Cuando un cliente está interesado en un apartamento que está disponible, permite actualizar el número de apartamentos apartados.

**AprCONSProy:** Permite verificar que si se cumplen las condiciones se pueda generar la aprobación de iniciar o construir el proyecto y actualizar la cantidad de apartamentos vendidos.

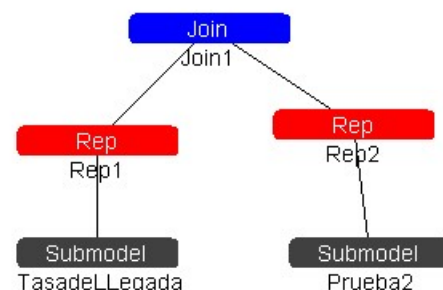
**InstantaneousActivity1:** Si se aprueba construir el proyecto se puede actualizar el número de apartamentos vendidos.



**Figura 3. Modelo de Proyecto Inmobiliario. Fuente: Autores**

### 4.4. Estructura de Modelo Integrado

Se realizó el modelo integrado con un *Composed* en Mobius, el cual se evidencia en la figura 4. Se realizaron 200 replicas del modelo de Cliente y una replica del Modelo de Proyecto Inmobiliario. Lo anterior significa que el modelo representa la llegada de 200 clientes y la disponibilidad de un proyecto inmobiliario con 200 apartamentos.



**Figura 4. Modelo Integrado. Fuente: Autores**

### 4.5. IMPLEMENTACIÓN DE CONTRATO INTELIGENTE EN BLOCKCHAIN

Para el contrato de compra de vivienda sobre planos se hace viable crear un contrato inteligente que ofrezca las garantías y regule las obligaciones por cada una de las partes involucradas (constructora y clientes). En dicho contrato se modelan los siguientes eventos:

- 1 Una constructora crea un contrato para la gestión

de ventas del proyecto de vivienda sobre planos. Para la creación de dicho contrato debe ingresar como parámetro; la cantidad de apartamentos del proyecto, el tiempo sobre planos del proyecto, el precio de venta de las viviendas en fase de planos, el precio de la vivienda en su fase de construcción y el porcentaje de apartamentos que debe venderse en la fase de planos para que se apruebe la construcción del proyecto. Cuando se crea el contrato, el sistema de blockchain le asigna una dirección que será compartida con los clientes para que ellos puedan realizar los pagos.

- 2 Luego de crear un contrato, un cliente puede registrarse para hacer las transacciones (pagos de separación y pagos mensuales). Para ello, se requiere la dirección del cliente dentro de la blockchain (*address*).
- 3 Cuando el cliente ejecuta la primera transacción (pago de separación) el contrato ejecuta la función de separación de la vivienda. El cliente debe realizar las otras transferencias mensualmente. Tanto para el pago inicial como para los pagos de cuotas mensuales, el cliente debe hacer llamados a la función a los respectivos pagos definidos en el contrato.

#### **Ejecución de acciones en forma automática**

El contrato inteligente al ser creado parametriza la ejecución de acciones en forma automática. El conjunto de acciones a realizar comprende lo siguiente:

- Cuando se cumpla la fecha límite de la fase de oferta sobre planos, el contrato valida el porcentaje de apartamentos separados. Si este porcentaje es menor al estipulado, ejecuta la función que retorna el dinero a los clientes. Si el porcentaje es mayor, se ejecuta la función que transfiere una parte de los fondos a la constructora para que ejecute la fase de construcción. La otra parte de los fondos los retiene en el contrato con el fin de respaldar devoluciones de dinero al cliente que incumple el acuerdo de pagos.
- Cuando el cliente incumple el pago de tres cuotas mensuales consecutivas, el contrato realiza la devolución del 40% del dinero aportado y libera la vivienda que estaba apartada por él, es decir, el apartamento queda disponible para ser separado de nuevo por otro cliente. El saldo que

le fue descontado se transfiere a la wallet de la constructora.

#### **Funciones del contrato inteligente**

**Creación de un proyecto inmobiliario** El contrato inteligente en primera medida se conforma de un conjunto de parámetros. Se debe agregar la cantidad de viviendas que lo conforman, el valor de la cuota inicial del apartamento, el nombre del proyecto, la fecha límite de oferta sobre planos, y la fecha en que se entregará la vivienda.

**RegistroNuevoCliente** Al implementar (deploy) el contrato inteligente en la blockchain, este queda listo para registrar los clientes mediante la función RegistroNuevoCliente la cual dispone un formulario para el registro de datos personales y la asignación de una de las viviendas. Para que el registro sea exitoso, el cliente debe además de diligenciar el formulario, debe hacer un primer pago que exige la constructora para la separación del apartamento.

**PagoCuotaMensual** Función que debe ejecutar el cliente para realizar los pagos mensuales acordados

**TransfereciadeDineroConstructora** Función usada por la constructora para hacer la transferencia del dinero que cuenta el contrato a su billetera (previa verificación del cumplimiento del punto de equilibrio definido)

**CortesDelMes** Función ejecutada por la constructora para validar las cuotas pendientes de todos los clientes (Si algunos de ellos han incumplido el pago de varias cuotas se inhabilita y se libera la vivienda)

**CancelarSeparacionApartamento** Usada para que el cliente pueda anular la compra de la vivienda y le sea devuelto el dinero transferido al contrato (descotando el porcentaje de penalización).

Al compilar el contrato y hacer uso de cada una de las funciones, se generan los costos de transacciones en el sistema de la blockchain Ethereum. Para hallar estos valores, se compilo el contrato en la red de pruebas de ethereum llamada Ríbenky. Los resultados de la ejecución del contrato pueden consultar en <https://rinkeby.etherscan.io/address/0x58b8366ffad7672f58b76134a7248661cb6c82ab#events>

Acción de Contrato	Costo Transacción
CompilaciónContrato	0.000949725
RegistroNuevoCliente	0.000279143
PagoCuotaMensual	0.000047802
Devolución	0.000025354
TransfDineroConstructora	0.000029852
CortesDelMes	0.000087081

**Tabla 1. Costos de transacciones de contrato inteligente.**

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La dinámica del modelo propuesto fue validada con los parámetros iniciales descritos en la tabla 1. Los resultados se basan en una simulación de 36 meses con semilla 31415 usando un procesador amd64.

Parametro	Unidad	Valor Inicial
Número clientes	Número	300
Número apartamentos	Número	200
Número proyectos	Número	1
Tiempo oferta planos	Meses	12
Tiempo horizonte	Meses	24
Aumento precio	Porcentaje	20
Punto equilibrio	Porcentaje	60

**Tabla 2. Parametros Iniciales.**

Para el presente proyecto, se seleccionaron dos criterios para efectuar análisis de sensibilidad sobre la dinámica del modelo. El primer criterio hace referencia a la generación de 3 instancias dependiendo del perfil del cliente de acuerdo con su nivel de riesgo. Esta medida de riesgo está relacionada con la probabilidad de incumplimiento con el pago de las cuotas 1, 2 y 3. Así, las instancias para tener en cuenta corresponden a los definidos en la tabla 2.

Categoría de Cliente	Cuota 1	Cuota 2	Cuota 3
Riesgo Alto	60 %	40 %	2 %
Riesgo Moderado	20 %	15 %	10 %
Riesgo Bajo	5 %	5 %	5 %

**Tabla 3. Categoria Clientes.**

Finalmente, el segundo criterio utilizado corresponde a la generación de instancias teniendo en cuenta la variación del tiempo de oferta en planos del proyecto donde se definieron 3 instancias (Ver tabla 3).

Tiempo (meses)	Instancia 1	Instancia 2	Instancia 3
Tiempo Total	24	24	24
Tiempo planos	6	12	18

**Tabla 4. Criterio 2.**

Con base en estos criterios se definieron 5 escenarios:

- Escenario 1: Riesgo Bajo – Instancia 2
- Escenario 2: Riesgo Moderado – Instancia 2
- Escenario 3: Riesgo Alto – Instancia 2
- Escenario 4: Riesgo Moderado – Instancia 1
- Escenario 5: Riesgo Moderado – Instancia 3

Las medidas de desempeño a evaluar se definieron en función de los objetivos planteados. De esta manera se consideraron las siguientes medidas:

**Número de transacciones de pagos (P):** Este indicador mide el volumen de transacciones de pago de cuotas mensuales realizadas por todos los clientes dentro del horizonte del proyecto.

**Número de transacciones de devoluciones (D):** Este indicador mide la cantidad de devoluciones realizadas en el horizonte del proyecto. Una devolución ocurre cuando un cliente incumple con el pago de 3 cuotas consecutivas.

**Número de apartamentos separados (S):** Este indicador cuantifica la cantidad de veces que un cliente realiza la separación de un apartamento. La separación corresponde al momento en el cual el cliente toma la decisión de adquirir el apartamento y acuerda con la constructora el plan de pagos mensuales.

**Costo total de transacciones (CT<sub>i</sub>):** El costo total de la operación inmobiliaria durante el horizonte del proyecto esta dada por la siguiente ecuación:

$$CT_i = C_{CC} + C_{AS} * S + C_{PM} * P + C_D * D + C_A + C_T$$

En donde,

**Creación contrato (C<sub>CC</sub>)** correspondiente al costo en el que incurre la constructora cuando genera un nuevo proyecto inmobiliario y decide gestionarlo. Este costo se genera una única vez al inicio del proyecto.

**RegistroCliente (C<sub>AS</sub>)** correspondiente al costo que asume un cliente al tomar la decisión de adherirse al proyecto y generar la separación del apartamento.

**Pago Cuota mensual (C<sub>PM</sub>)** correspondiente al costo generado cada vez que el cliente realiza un pago



mensual dentro del horizonte del proyecto.

**Devoluciones**( $C_D$ ) correspondiente al costo generado cada vez que ocurre un evento de evolución en la plataforma de blockchain.

**VerificarCorte**( $C_A$ ) corresponde al costo administrativo relacionado con la evaluación sobre el estado general del proyecto que realiza la constructora mensualmente.

**Transferencia**( $C_T$ ) corresponde al costo generado a partir de la aprobación de la construcción del proyecto inmobiliario, en donde la fiduciaria realiza la transferencia del dinero para dar paso a la construcción del proyecto. A partir de ese momento, las transferencias se realizan en periodos mensuales según los recaudos generados mes vencido.

Los resultados obtenidos para cada escenario fueron los siguientes donde  $N_{pagos}$  es el volumen de pagos,  $N_{Dev}$  es el volumen de devoluciones y  $N_{Sep}$  la cantidad de veces que un cliente realizó la separación de un inmueble:

	N Pagos	N Dev	N Sep
Escenario 1	2045	0	200
Escenario 2	1792	5	205
Escenario 3	1209	51	251
Escenario 4	1791	2	202
Escenario 5	1784	6	206

**Tabla 5. Resultados.**

Se puede observar que el mayor número de devoluciones se presentó en el Escenario 3, dado que las probabilidades de incumplimiento de pago son las mas altas en este escenario. Por lo tanto, se espera que, debido al incumplimiento recurrente del cliente, la constructora deba realizar mayores devoluciones a los clientes del dinero y liberar los apartamentos. Adicionalmente en este escenario se presente el menor número de transacciones debido a que la frecuencia de los pagos es menor debido al incumplimiento del cliente (El cliente puede pagar más de un mes en una sola transacción y el costo de la transacción no depende del número de meses).

Medida de desempeño	$C_{CC}$	$C_{AS}$	$C_{PM}$	$C_D$	$C_A$	$C_T$	Total
Escenario 1	\$ 1.600	\$ 92.400	\$ 77.302	\$ 0	\$ 3.456	\$ 754	\$ 275.512
Escenario 2	\$ 1.600	\$ 94.710	\$ 155.366	\$ 145	\$ 3.456	\$ 754	\$ 256.031
Escenario 3	\$ 1.600	\$ 115.962	\$ 104.820	\$ 1.479	\$ 3.456	\$ 754	\$ 228.071
Escenario 4	\$ 1.600	\$ 93.324	\$ 155.280	\$ 58	\$ 3.456	\$ 1.102	\$ 254.820
Escenario 5	\$ 1.600	\$ 95.172	\$ 154.673	\$ 174	\$ 3.456	\$ 406	\$ 255.481

**Figura 5. Costos. Fuente: Autores**

El costo total promedio teniendo en cuenta los escenarios evaluados es de \$ 253.983 con una desviación estándar de \$ 16.897, obteniendo un coeficiente de variación del 6.7% aproximadamente. Lo anterior indica una variación relativamente pequeña lo cual se interpreta como una baja sensibilidad ante la variación de los parámetros objeto de estudio en los escenarios.

Se puede observar que el mayor costo total se presentó en el escenario 1, donde los clientes tienen la menor probabilidad de incumplir lo que hace que las devoluciones sean cero, sin embargo, esto hace que las transacciones de pagos sean mayores y en este caso sea la transacción dominante y por lo tanto el costo se eleve.

Por ultimo se puede evidenciar que la variación del tiempo de oferta sobre planos no genera un impacto significativo sobre el costo total. Lo anterior dado que revisando los resultados de la simulación se puede evidenciar que la mayoría de los clientes llegan en los primeros meses, es decir, en el tiempo de oferta sobre planos.

## 6. CONCLUSIONES

Las Redes de Petri resultan ser una herramienta eficiente para modelar sistemas complejos. En este trabajo se utilizó para modelar y analizar una operación inmobiliaria en la cual se requiere el cumplimiento de varias condiciones para disparar transacciones (transiciones) necesarias en el contexto de venta de inmuebles nuevos donde se usa un contrato inteligente apoyado en Blockchain.

Por otro lado, las Redes de Petri permiten modelar la incertidumbre a la cual se encuentran sujetos los diferentes actores del sistema inmobiliario analizado mediante la incorporación de distribuciones de probabilidad en las actividades realizadas dentro de la operación de compraventa.

Adicionalmente se realizó un análisis de escenarios teniendo en cuenta diferentes perfiles de riesgo de los clientes y variaciones al tiempo de oferta sobre planos del proyecto, en donde se puede evidenciar que la variación en el tiempo de oferta sobre planos no impacta significativamente en el costo total de la administración del proyecto. Sin embargo el estudio de los diferentes perfiles de riesgo del cliente nos permite evidenciar variaciones en el costo total obteniendo como resultado que para disminuir costos de transacción los pagos pueden ser acordados en

periodos diferentes a mensualidades, por ejemplo evaluar la posibilidad de realizar pagos trimestrales o bimensuales.

Un sistema de contrato inteligente soportado en Blockchain para una operación inmobiliaria de compra de inmuebles nuevos permite disminuir los costos transaccionales y de intermediación mediante la automatización de transacciones, esto se puede verificar con la cuantía de costos totales que se reportan en los resultados.

Blockchain tiene diversas aplicaciones más allá del soporte a la dinámica de transacción de criptomonedas como Bitcoin, que es el uso más conocido y generalizado. Por medio de este trabajo se exploran algunas aplicaciones menos tradicionales como la implementación de un contrato inteligente aplicado específicamente al sector inmobiliario.

## Referencias

- [1] M. Giancaspro, Is a smart contract really a smart idea? Insights from a legal perspective, Computer Law & Security Review 33, 2017, pp. 825 – 835.
- [2] Yuan R, Xia YB, Chen HB et al. ShadowEth: Private smart contract on public blockchain. JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY 33(3): 542–556 May 2018. DOI 10.1007/s11390-018-1839-y
- [3] P. Tasatanattakool, C. TechapanuPreeda, Blockchain: Challenges and applications, IEEE, pp: 473-475.
- [4] A. Pina, R. Tonelli, M. Orrú, M. Marchesi, A Petri Nets Model for Blockchain Analysis, arXiv (2017).
- [5] J. Clempner, Verifying soundness of business processes: A decision process Petri nets approach, Expert Systems with Applications 41 (2014) 5030–5040
- [6] LI. Yonghao, LIU. Yun, Research on Modeling of Multiparty Trust Negotiation based on Coloured Petri-net in P2P Network, Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2010.
- [7] E. Jiménez, M. Pérez, F. Sanz, Modelado y simulación de sistemas logísticos y de producción mediante redes de petri, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol 2, Núm 4, 2005, pp 39-53.
- [8] S. Nakamoto, Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System, 2009.

## 6.A. Anexo I. Pseudocodigo

De manera general el contrato inteligente realiza los siguientes procedimientos y validaciones:

---

### Algoritmo 1 Creación de Contrato Inteligente en Blockchain de Ethereum

---

**Entrada:** Constructora administradora del contrato.  
Crear proyecto inmobiliario  
**mientras** Existan inmuebles disponibles **hacer**  
    Registrar cliente  
    Generar acuerdo de Pago  
**fin mientras**

---

---

### Algoritmo 2 Continuíón reacción de Contrato Inteligente en Blockchain de Ethereum

---

**mientras** No haya finalizado el tiempo de oferta sobre planos **hacer**  
    Evaluar mensualmente los pagos de los clientes  
    **si** Un cliente no ha realizado el pago de 3 cuotas consecutivas **entonces**  
        **devolver** Devolver 40 % el dinero  
        **devolver** Liberar apartamento (Volver a ofertar)  
    **si no**  
        Realizar pago cuota mensual  
    **fin si**  
**fin mientras**  
**si** Se alcanzó el punto de equilibrio **entonces**  
    **devolver** Transferir dinero recaudado a constructora  
    **devolver** Iniciar construcción de inmuebles  
**si no**  
    Devolver 100 % de dinero a clientes  
**fin si**  
**devolver** Fin de contrato

---