

## DISEÑO DE UN MODELO PREDICTOR MATEMÁTICO PARA LA SIMULACIÓN DE LA DEMANDA DE REPUESTOS CRÍTICOS CONTROLADOS DEL UNIMOG 4000.

**Fecha de recepción:** 28 de diciembre de 2021

**Fecha de aceptación:** 28 de febrero de 2022

CAP. Eduardo Riffo Yáñez.<sup>1</sup>

**Resumen:** La investigación aborda la problemática generada por el actual retardo logístico en los repuestos críticos controlados del Unimog 4000, que afecta la disponibilidad del vehículo, durante un período determinado de tiempo. El propósito, es brindar una alternativa de solución al problema planteado, mediante la simulación de un modelo predictor matemático, que integre aspectos de las funciones logísticas de mantenimiento, obtención y abastecimiento, y con ello, determinar la demanda de repuestos críticos controlados para un período definido, disminuyendo así, el actual retardo logístico y con ello, mejorar su tiempo de no disponibilidad en el mantenimiento recuperativo básico.

Lo anterior, mediante una investigación descriptiva analítica, para el marco teórico y el diagnóstico de la situación actual de retardo logístico. Posteriormente, a través del enfoque correlacional exploratorio, se selecciona las variables y se diseña un modelo predictor matemático de la demanda de repuestos críticos controlados, el cual finalmente es simulado para obtener los resultados esperados, y a su vez modificado en distintos escenarios de un ambiente controlado, que proporcione información útil para la toma de decisiones.

**Palabras claves:** Retardo logístico, disponibilidad, modelar y simular.

## DESIGN OF A MATHEMATICAL PREDICTIVE MODEL FOR THE SIMULATION OF THE DEMAND FOR CONTROLLED CRITICAL SPARE PARTS OF THE UNIMOG 4000.

**Abstract:** The research was based on the problematic generated by the nowadays logistic delayed on the critical parts controlled by Unimong 4000, that affects the availability of the vehicle, during a certain period of time. The purpose of this investigation is to provide an alternative solution to problem explanianed, Through the simulation of a mathematical predictor model, that involves different logistic functions of mantanining, obtention and catering. With this it is pretended to decide the demand of critical parts controled for one specific period, getting lower the current logistics delay, and with this, improving the period of time in which is not available in basic recuperative maintenance.

The above, through an analytical descriptive research, for the theoretical framework and the diagnosis of the current situation of logistic delay. Subsequently, through the exploratory correlational approach, the variables are selected and a mathematical predictive model of the demand for controlled critical spare parts is designed, which is finally simulated to obtain the expected results, and in turn modified in different scenarios of a controlled environment, which provides useful information for decision making.

**Key words:** Logistic delay, availability, modeling and simulation.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Politécnico Militar mención Abastecimiento y Finanzas de la Academia Politécnica Militar, Santiago, Chile. Actualmente se desempeña como asesor de Abastecimiento del Cuartel General de la I División del Ejército de Chile. Email: eduardo.riffo@ejercito.cl

## **1. INTRODUCCIÓN**

En cualquier tipo de organización ya sea grande o pequeña, el manejo del inventario es fundamental para el éxito de esta, pues una adecuada administración puede significar grandes ahorros, y disminución de riesgos, asociados a una buena gestión del inventario.

El tiempo de espera es uno de los factores más engañosos en todo el campo de la logística, ciertamente nadie puede discutir que es la condición indispensable dentro de la complejidad de la logística, pues bien hay dos razones que tienden a equivocar esto, primero, en muchas ocasiones se piensa que la solución está en reducir los tiempos dentro de los procesos establecidos y, el segundo lugar, se reconoce poco, que el plazo de entrega abarca realmente más de lo que implican términos calificativos como producción, adquisición, suministro y logística, es más, abarca desde el reconocimiento de una necesidad hasta el momento en que se cumplen todos los requisitos para llevar a cabo una misión.

Respecto a lo anterior, no se cuenta con una herramienta que permita calcular la cantidad de repuestos que se necesita adquirir, para un periodo determinado.

La metodología utilizada para el desarrollo de la presente investigación inicia con un enfoque descriptivo y analítico, el cual considera la recolección y descripción de los antecedentes cualitativos y cuantitativos, para un análisis y diagnóstico del retardo logístico. Lo anterior, permite continuar con un enfoque correlacional exploratorio, donde se identifica las variables y se diseña y simula un modelo, con la finalidad de lograr obtener los resultados esperados, correspondiente a la cantidad de repuestos críticos controlados que se necesitaran, disminuyendo el actual retardo logístico, y mejorando con ello, el tiempo de no disponibilidad del vehículo en los Mantenimientos Recuperativos Básico.

## **2. PROCESO DE DESARROLLO DE CAPACIDADES MILITARES Y ADMINISTRACIÓN DEL CICLO DE VIDA**

El Ejército a través del RAA-03008 “Reglamento proceso de desarrollo de capacidades militares y administración del ciclo de vida”, define las principales actividades que se realizan durante todo el proceso de desarrollo e implementación de las capacidades militares de la fuerza terrestre, como también, el rol que le compete a los organismos que participan de este proceso, es así, que en la 3ra “Fase Operación y Sostenimiento – cuarta etapa Operación y mantención” del ciclo de vida, que corresponde al período de tiempo donde la capacidad militar adquirida se encuentra disponible y las unidades están en condiciones de hacer uso de ella, pero también, es donde se ejecutan las actividades requeridas para el soporte, es decir, se ejecutan las funciones logísticas de abastecimiento, mantenimiento, transporte y atención de modo que la capacidad se encuentre en el nivel y condiciones que fueron previstos en los perfiles de uso para el cumplimiento de la vida útil establecida.

## 2.1. Proceso de mantenimiento Institucional

En esta investigación el tipo de mantenimiento que se abordó corresponde al recuperativo, y el nivel respecto al tipo de unidad, es el básico.

En el RDL- 20003 “Reglamento de mantenimiento”, se define el Mantenimiento Recuperativo Básico como un conjunto de tareas de mantenimiento, que tienen la finalidad de restituir la funcionalidad perdida o disminuida del material o de sus elementos o conjuntos componentes, y agrupa las siguientes tareas de mantenimiento: diagnóstico, corrección, reparación, sustitución, eliminación y reemplazo después de falla.

Esta tiene su ejecución cuando se identifica o detectan los daños o fallas funcionales del material, y obedece a un mantenimiento no programado, necesario para recuperar el material que ha perdido su condición de operabilidad, siendo el protocolo utilizado, la “Orden de Trabajo”. Pese a lo anterior, su ejecución se podría aplazar una vez detectado el problema, debido a prioridades o disponibilidad de recursos, y el proceso de orden de trabajo se describe en la Figura N° 1.

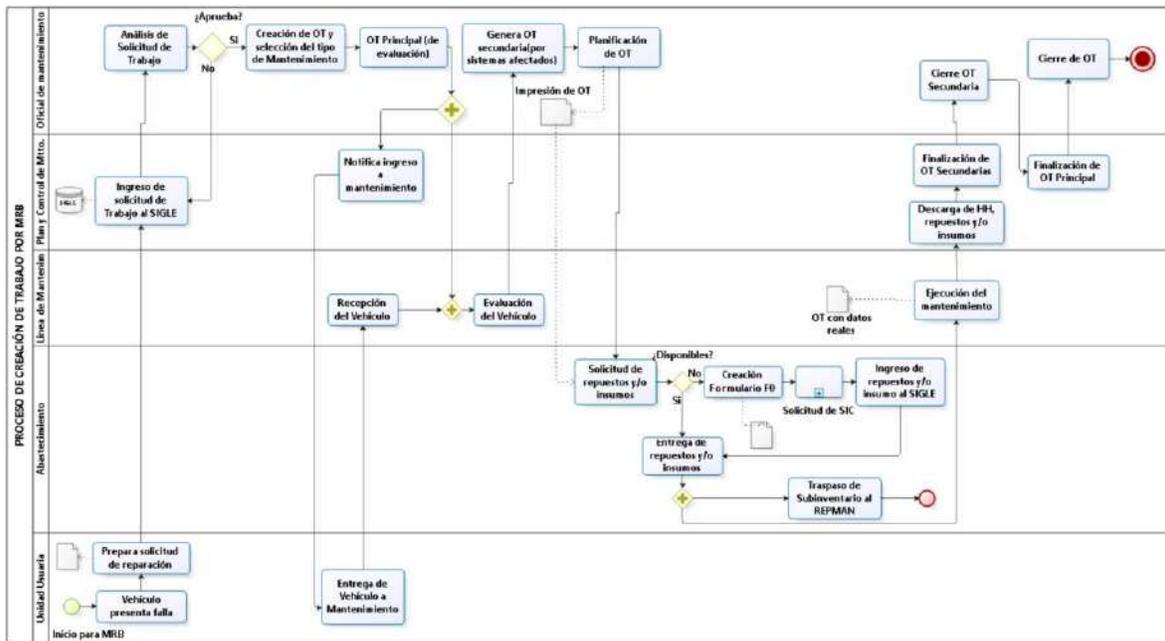


Figura N° 1: “Proceso de Orden de Trabajo para mantenimiento recuperativo básico”.

Fuente: Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo.

Para poder cumplir lo anterior, es fundamental la coordinación de los procesos de obtención, abastecimiento y transporte, con el propósito de que los insumos y repuestos estén disponible en el momento, cantidad y calidad requeridos.

## 2.2. Subproceso de compra Institucional

El subproceso de compra se encuentra inserto en el proceso de adquisiciones, y cuenta con 3 etapas principales conforme a la representación de la siguiente figura:

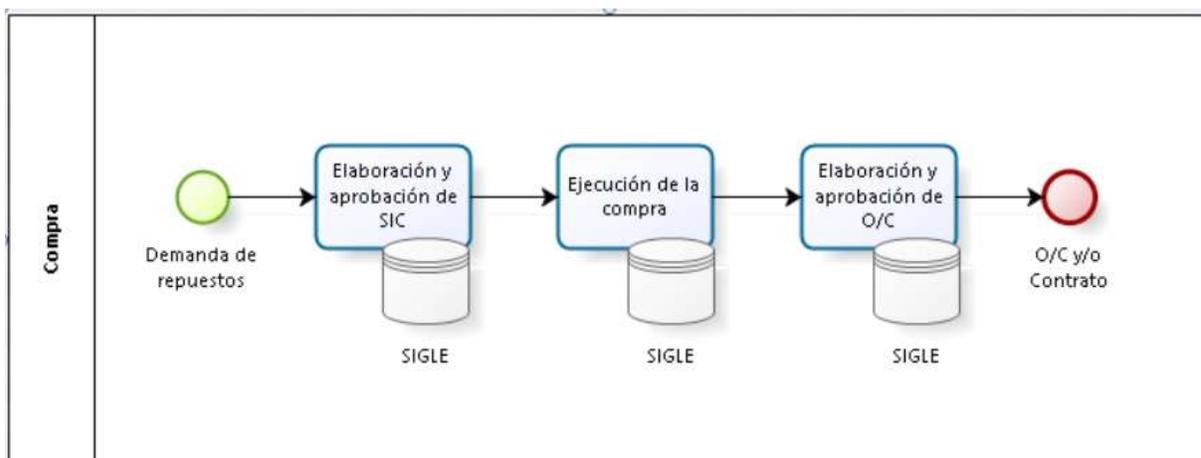


Figura N° 2: “Subproceso de compra”.

Fuente: Elaboración propia.

Es un proceso que consta de varias etapas y requisitos dispuestos por la Ley N° 19.886 de Bases sobre contratos administrativos de suministros y prestaciones de servicios, en donde conforme a las distintas condiciones de la compra, se requieren tiempos mínimos en su ejecución, los cuales deben ser cumplidos, por lo que no se permite reducir estos tiempos de manera arbitraria.

Además, en cumplimiento a lo dispuesto en la Ley N°19.886, su reglamento y disposiciones atinentes a las compras públicas, elabora el MAL – 01003 “Manual de procedimientos de adquisiciones por medio de Chilecompra- mercado Público”, manual que norma los procedimientos de adquisiciones a través de la plataforma Mercado Público y establece que las unidades deberán extremar sus procedimientos internos, ejecutándolos de manera eficiente, con el objeto de dar cumplimiento al pago antes de los 30 días contados desde la fecha de la recepción conforme de la factura.

Cuando se genera una necesidad de compra, el requirente o demandante enviará al comandante del Centro de Gestión de Adquisiciones (CGA), una Solicitud de Compra (SIC), documento interno que representa la solicitud del requerimiento de compra, y que contendrá lo siguiente: individualización del producto o servicio por adquirir con sus características técnicas descritas detalladamente, cantidad requerida, monto total estimado para la contratación con el neto e IVA, fecha en la cual se necesita el bien o servicio y plazo por el cual se requiere, criterios, subcriterios, ponderaciones y puntajes para seleccionar las ofertas que se presenten, asignación presupuestaria tramitada, delegación de facultades si corresponde.

### 2.3. Subproceso de recepción de los repuestos

Este subproceso es parte de la función abastecimiento, función donde se ejecuta las actividades de recepción, almacenamiento, distribución y entrega de todas las clases y rubros de abastecimiento. Para este caso de estudio, el rubro que concierne es el de herramienta y repuestos.

A diferencia de los procesos anteriores, este posee mucho menos tiempo en su ejecución, debido a que inicia con la recepción del producto sin observaciones, generándose el ingreso a la plataforma y luego traspaso directo a la unidad de mantenimiento quienes materializarán la reparación del vehículo

### 2.4. Tiempos en los procesos relativos al retardo logístico

Mediante un estudio realizado por el Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo, se logró cuantificar el tiempo que demora la recuperación de ciertos activos que quedan en condición de no operacional a causa de una falla imprevista, arrojando como resultados la información que se muestran en la siguiente Figura N°3:



Figura N° 3: "Relación entre mantenimientos".

Fuente: Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo .

El actual proceso genera tiempos entre la detección de la falla y la materialización del respectivo mantenimiento, observación que se desea mejorar.

### 3. IDENTIFICACIÓN DE LOS REPUESTOS CRÍTICOS CONTROLADOS DEL VEHÍCULO EN ESTUDIO

El Ejército a través de la División Logística, clasifica los componentes que corresponden a la catalogación de repuestos controlados, para el caso de los vehículos motorizados corresponden a los siguientes:

| Descripción de los elementos |  | Clasificación |              |                     | Documentación Solicitada |                 |
|------------------------------|--|---------------|--------------|---------------------|--------------------------|-----------------|
|                              |  | Controlados   | Recuperables | Intercambio Directo | Parte de deterioro       | Informe Técnico |
| 1                            | Motores completos                            | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 2                            | Ensamblados de motor                         | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 3                            | Cajas de cambio                              | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 4                            | Cajas de transferencias                      | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 5                            | Winches delanteros y traseros                | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 6                            | Cajas de dirección                           | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 7                            | Bombas hidráulicas                           | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 8                            | Ejes delanteros y traseros conjunto completo | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 9                            | Generadores                                  | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 10                           | Alternadores                                 | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 11                           | Motores de partida                           | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 12                           | Distribuidores                               | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 13                           | Cajas reguladoras de voltaje                 | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 14                           | Carburadores                                 | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 15                           | Bomba inyectora (sistema diésel)             | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 16                           | Bomba gasolina                               | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 17                           | Bomba de agua                                | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 18                           | Bomba de aceite                              | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 19                           | Bomba de freno                               | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 20                           | Unidades de servo freno                      | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 21                           | Cilindro de rueda (freno)                    | X             | X            | X                   |                          |                 |
| 22                           | Disco de embrague                            | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 23                           | Prensa de embrague                           | X             | X            |                     | X                        | X               |
| 24                           | Cardan delantero intermedio y trasero        | X             |              | X                   |                          |                 |
| 25                           | Radiadores                                   | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 26                           | Paquetes de resorte traseros y delanteros    | X             |              | X                   |                          |                 |
| 27                           | Culatas                                      | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 28                           | Block cigüeñal                               | X             | X            | X                   | X                        | X               |

| Descripción de los elementos |                                      | Clasificación |              |                     | Documentación Solicitada |                 |
|------------------------------|--------------------------------------|---------------|--------------|---------------------|--------------------------|-----------------|
|                              |                                      | Controlados   | Recuperables | Intercambio Directo | Parte de deterioro       | Informe Técnico |
| 29                           | Compresores de aire                  | X             | X            | X                   | X                        | X               |
| 30                           | Amortiguadores delanteros y traseros | X             | X            | X                   |                          |                 |
| 31                           | Motor limpia parabrisas              | X             | X            | X                   |                          |                 |
| 32                           | Zapata de freno completa             | X             | X            | X                   |                          |                 |
| 33                           | Cajas reguladoras de solenoide       | X             |              | X                   |                          |                 |
| 34                           | Bobinas de encendido                 | X             |              | X                   |                          |                 |
| 35                           | Semi-ejes                            | X             |              | X                   |                          |                 |
| 36                           | Neumáticos                           | X             |              | X                   | X                        | X               |
| 37                           | Cámaras                              | X             |              | X                   | X                        | X               |
| 38                           | Baterías                             | X             |              | X                   | X                        | X               |
| 39                           | Llantas                              | X             |              | X                   | X                        | X               |

Tabla N°1: "Catalogación de repuestos clasificados como controlados".

Fuente: Elaboración Propia.

De la tabla anterior se observa que existen repuestos clasificados como controlados, a los que se debe ejercer un especial control del cargo físico, con lo cual, se logra obtener una primera clasificación, que corresponde a la totalidad de repuestos clasificados por la institución, como controlados para los vehículos motorizados, debiendo ahora continuar, para identificar aquellos que serán los críticos para el vehículo de la presente investigación.

### 3.1. Repuestos críticos

Analizada la base de datos, se elaboró un diagrama de Pareto, el cual se aprecia en la Figura N°4.

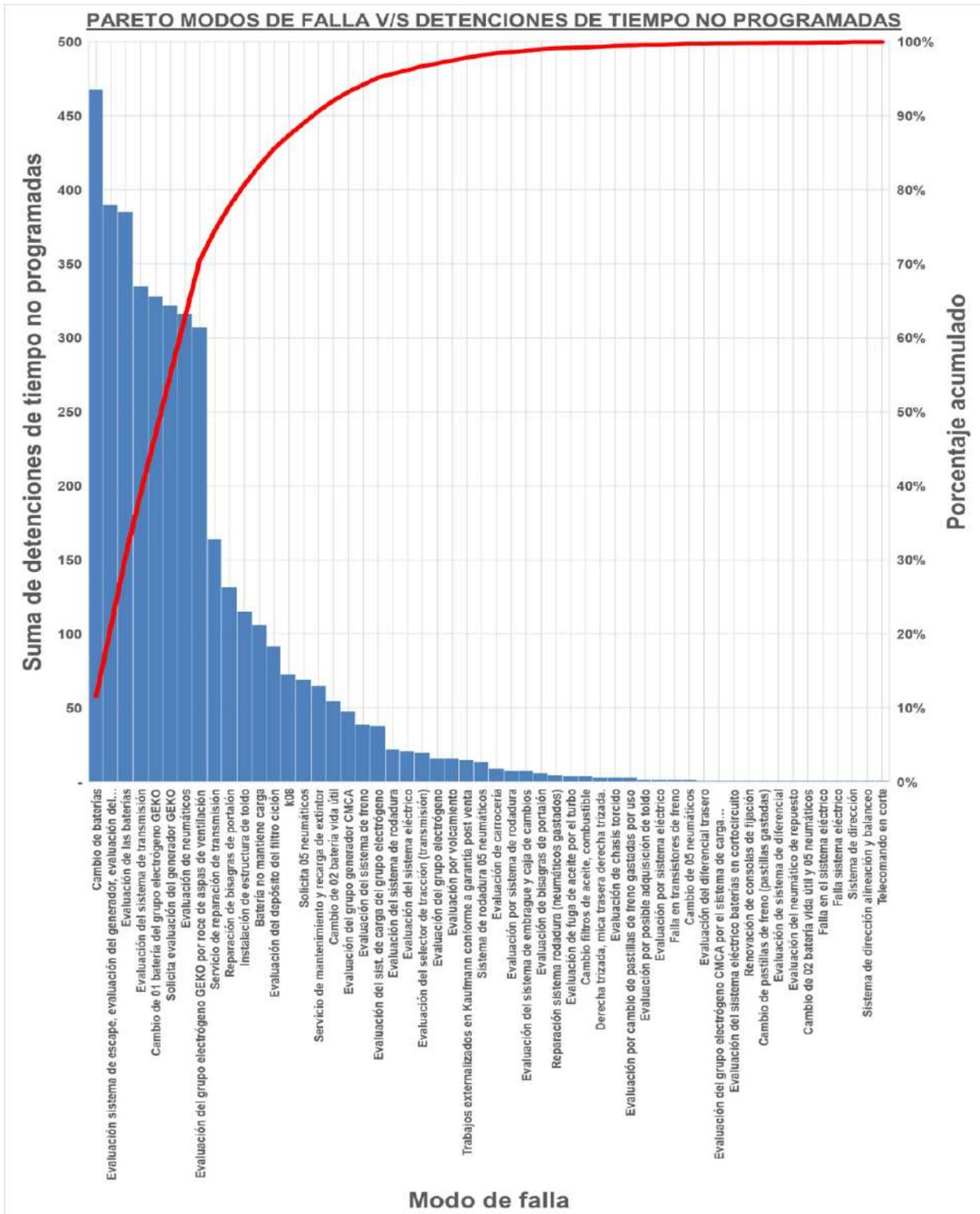


Figura N° 4: “Diagrama de Pareto de fallas v/s detenciones de tiempo no programadas”.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del resultado obtenido, los esfuerzos se focalizarán a las siguientes actividades y repuestos:

- A. Cambio de baterías.
- B. Evaluación sistema de escape, evaluación del generador, evaluación del sistema.
- C. Evaluación de las baterías.
- D. Evaluación del sistema de transmisión.
- E. Cambio de 01 batería del grupo electrógeno GEKO.
- F. Solicita evaluación del generador GEKO.
- G. Evaluación de neumáticos.
- H. Evaluación del grupo electrógeno GEKO por roce de aspas de ventilación.
- I. Servicio de reparación de transmisión.
- J. Reparación de bisagras de portalón.
- K. Instalación de estructura de toldo.

Por otra parte, a la misma base de datos se aplicó el método del diagrama de Jack Knife, una técnica de priorización, que se basa en métodos de dispersión logarítmica, donde se utilizó el tiempo promedio de reparación (MTTR) y el número de modos de fallas, resultando lo siguiente:

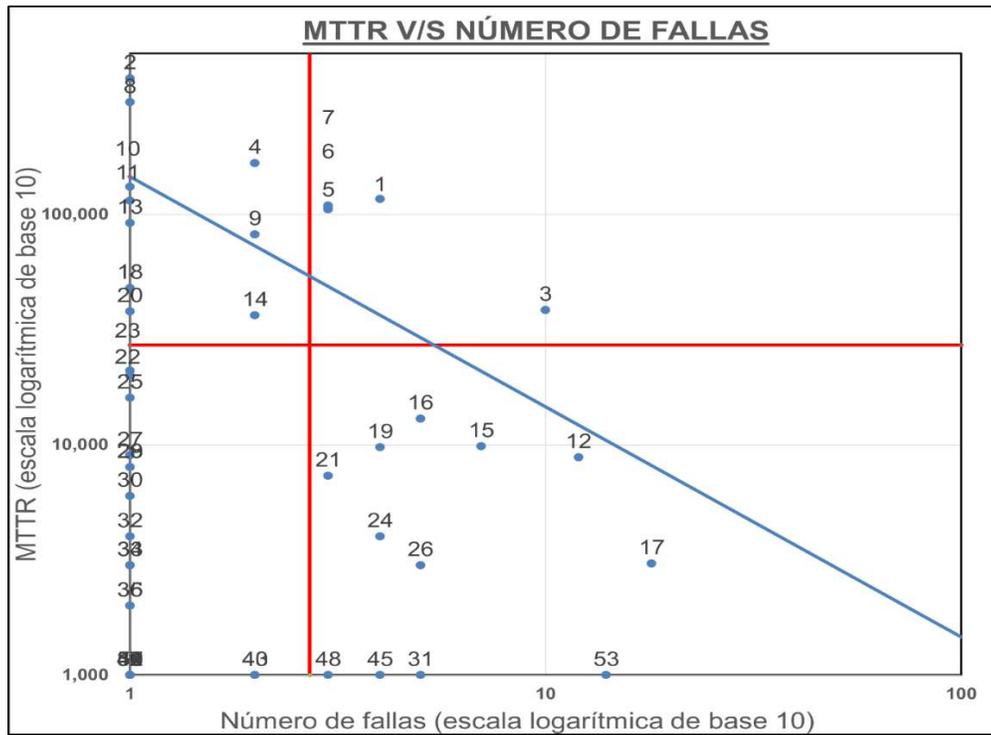


Figura N° 5: “Diagrama Jack Knife de tiempo promedio de reparación v/s número de fallas”.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior se puede observar la división de 4 cuadrantes, en donde cada uno de ellos hace referencia a lo siguiente:

- A. Cuadrante superior izquierdo: que corresponde a las fallas agudas, donde la falla es controlada, pero el vehículo queda largo tiempo fuera de servicio.
- B. Cuadrante inferior derecho: corresponde a las fallas crónicas, donde se generan fallas con bajo tiempo de reparación, pero en alta frecuencia.
- C. Cuadrante superior derecho: corresponde a una falla aguda o crítica, donde las fallas tienen alto tiempo de reparación y también una alta frecuencia.
- D. Cuadrante inferior izquierdo: corresponde a una falla leve, en que las fallas tienen bajo tiempo de reparación y baja frecuencia.

Las fallas identificadas en el cuadrante superior derecho son las siguientes:

- A. Cambio de baterías.
- B. Evaluación de las baterías.
- C. Cambio de batería del grupo electrógeno GEKO.
- D. Solicita evaluación del generador GEKO.
- E. Evaluación de neumáticos.

### 3.2. Repuestos críticos controlados

Luego de obtener los resultados anteriores, son ingresados a una tabla de resumen, para identificar los repuestos que cumplen con la mayor cantidad de estos criterios de evaluación, resultando lo siguiente:

| N° | Repuesto                                  | Controlable no recuperable | Análisis de Pareto | Análisis de Jack Knife | Total |
|----|---|----------------------------|--------------------|------------------------|-------|
| 1  | Cardán delantero intermedio y trasero     | X                          |                    |                        | 1     |
| 2  | Paquetes de resorte traseros y delanteros | X                          |                    |                        | 1     |
| 3  | Cajas reguladoras de solenoide            | X                          |                    |                        | 1     |
| 4  | Bobinas de encendido                      | X                          |                    |                        | 1     |
| 5  | Semi-ejes                                 | X                          |                    |                        | 1     |
| 6  | Neumáticos                                | X                          | X                  | X                      | 3     |
| 7  | Cámaras                                   | X                          |                    |                        | 1     |
| 8  | Baterías                                  | X                          | X                  | X                      | 3     |
| 9  | Llantas                                   | X                          |                    |                        | 1     |

Tabla N°2: "Repuestos críticos y controlados".

Fuente: Elaboración propia.

Se puede identificar, que aquellos repuestos controlados, que coinciden dentro de la identificación de los repuestos críticos que se identificaron mediante los análisis antes mencionados, corresponde a las baterías y neumáticos, razón por la cual, estos corresponderán a los repuestos críticos controlados sobre los cuales se basará esta investigación.

#### 4. IDENTIFICACIÓN DE MODELOS PARA INVENTARIO DE REPUESTOS

Considerando que los inventarios de repuestos poseen una particularidad debido a su condición como partes de un sistema, en la literatura encontramos diferentes modelos que buscan responder a estas condiciones, es así, que es posible establecer la siguiente taxonomía de modelos existentes:

- A. Modelos integrales.
- B. Modelos por segmento de repuestos.
- C. Modelos basados en mantenimiento.
- D. Modelos con estrategias de abastecimiento o manejo logístico.

Los modelos integrales, buscan dar una mirada global a los repuestos, considerando las interacciones con los procesos de las organizaciones, su demanda y problemáticas, es así, como muchos buscan alinear las estrategias de mantenimiento y de abastecimiento dentro de las organizaciones.

Los modelos por segmentos, buscan dar solución a una problemática específica de repuestos o a un tipo dado de repuestos, es así, como en la literatura existen muchos de estos modelos que se basan en repuestos de tipo reparables, o en la búsqueda de grandes compras por volumen, generando con ello los respectivos descuentos. Por otra parte, otros que se basan en la definición de políticas de localización de repuestos, desde varias bases (lugares), que demandan estos repuestos reparados a una planta de reparación central.

Los modelos basados en mantenimiento, emplean información del mantenimiento para poder predecir el comportamiento de los repuestos.

Los modelos que incluyen estrategias de abastecimiento buscan dar solución a una problemática de los repuestos relacionada con su logística, optimización de su distribución o la gestión desde estrategias del abastecimiento, como lo son enfocados en localización que buscan minimizar los tiempos de suministros, otros que basan ciertos repuestos con externalización o subcontratación del mantenimiento (generalmente de repuestos críticos).

Dado todo lo anterior, y considerando dar una solución a la problemática existente, se optó por desarrollar un tipo de modelo integral para determinar la demanda de repuestos críticos controlados del Unimog 4000, el cual se alinearán a las estrategias de mantenimiento y obtención de la Institución, donde se pueda atender de manera balanceada los requerimientos de disponibilidad de repuestos para el mantenimiento y a su vez, el adecuado uso del capital invertido en repuestos.

#### 4.1. Modelo para la gestión de inventario

La demanda presenta varios tipos de clasificación, entre las cuales se encuentra la clasificación discreta, continua o por un período.

La demanda por un período tiene relación en el caso de productos de temporada o que solo se van a necesitar una sola vez, satisfaciendo la necesidad en el período que se haya determinado. La demanda continua, es aquella que se mantiene en el tiempo, pero esta a su vez presenta fluctuaciones, en donde durante este tiempo se pueden tomar varias decisiones y las políticas se van a repetir de manera sistemática a lo largo del tiempo. Respecto a la demanda discreta, es aquella expresada por períodos de tiempo, aquí la demanda es cierta durante cada período, en este caso las políticas deciden en cada período, el cuándo y cuánto comprar.

Para este caso de estudio, que tiene relación con el Ejército, la demanda continua, es la que se ajusta a las condiciones presentes en la institución, debido a que la cantidad demandada se enmarca en un período definido.

La demanda continua presenta dos modelos, donde una es la gestión por punto de pedido, que define un punto del stock, en el que si alcanza un valor inferior se activa un pedido en cantidad constante y que junto con ello se minimizan los costos de lanzamiento, adquisición y almacenamiento. El segundo modelo es por aprovisionamiento periódico, donde se busca el cuándo pedir de manera prefijada en el tiempo donde se compensen los costos de adquisición y de almacenamiento. Luego conocido el cuándo pedir, se procede a determinar el cuanto pedir que permita mantener el stock hasta cuando llegue el próximo pedido.

Para este caso de estudio, considerando que los costos de lanzamiento, de adquisición y de almacenamiento no son relevantes a la condición de la Institución, se trabajará sobre el modelo de aprovisionamiento periódico, con el propósito de con el cuándo pedir prefijado por el mando, se logre determinar el cuanto pedir considerando un stock en bodega.

#### 4.2. Modelo de aprovisionamiento periódico

Este método de aprovisionamiento busca encontrar el valor a dos variables, que son la periodicidad y la cantidad de pedido, donde la periodicidad es el plazo de tiempo que debe transcurrir entre los dos pedidos. Para el caso de la cantidad de pedido, esta se encuentra relacionada con 4 parámetros que son: consumo esperado, el plazo de entrega, el precio de compra, y los costos de adquisición y de posesión; de esta manera se logra optimizar el stock y el nivel de servicio.

La fórmula general corresponde a:

$$Q = \text{Cantidad de pedido} = \text{Cobertura} - \text{Stock} - \text{Pedidos pendientes}$$

Cobertura: Corresponde a la cantidad que debe cubrir el consumo durante el período de tiempo de los pedidos (T) más el plazo de entrega (E). En estos modelos se determina un período fijo (T) donde se verificará la cantidad de inventario disponible y los niveles deseados, para realizar los reabastecimientos del inventario. La determinación de “T” (tiempo) se obtiene al dividir 12 por la cantidad de pedidos en un año. Todo lo anterior se muestra en la Figura N° 6.

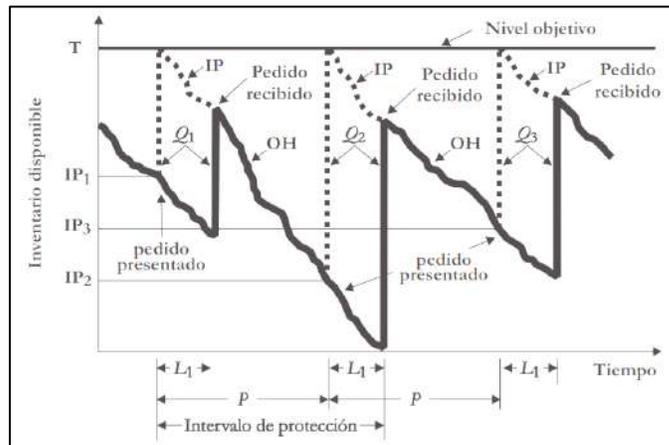


Figura N° 6: “Revisión periódica con reposición hasta un nivel fijo”.

Fuente: Garrett J. van Ryzin, “Analyzing Inventory Cost and Service in Supply Chains”.

Para continuar, es necesario aclarar que este modelo considera los costos totales de adquirir y de posesión, donde el costo de adquisición corresponde a la suma de todas las ordenes realizadas en el año (sueldos, seguros sociales, teléfono, viajes, etc.) y los costos de posesión tienen relación con el tamaño del almacén y que se puede expresar como un porcentaje sobre el valor del stock. Para este caso de estudio, los costos no serán incluidos.

Para calcular la cobertura se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = m * (T + E) + K \sqrt{m^2 \sigma_E^2 + E^2 \sigma_m^2}$$

Donde:

m = Consumo medio mensual del producto.

T = Periodicidad o frecuencia de pedido.

E = Plazo de entrega.

K = Coeficiente que puede tomar distintos valores según el grado de nivel de servicio que se quiera entregar.

$\sigma E$  = Desviación estándar del plazo de entrega.

$\sigma M$  = Desviación estándar del consumo.

Por lo tanto, para calcular la cantidad a pedir en el aprovisionamiento periódico como lo dice la ecuación, a la cobertura se le debe restar el stock presente y lo que se encuentra como pedido en curso.

## 5. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES PARA EL MODELO

En términos generales, las variables representan características y atributos medibles que están sujetos a cambios a medida que avanza la investigación y se comprueban los resultados.

Se materializó una reunión con personal que desempeña funciones en el Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo de la DIVMAN, donde junto a las variables indicadas anteriormente, se identificaron las variables que se asocian para el diseño del modelo predictor matemático para la demanda de los repuestos críticos controlados del Unimog 4000, resultando entre otros, lo siguiente:

- A. Stock de bodega.
- B. Nivel de servicio.
- C. Stock de seguridad.
- D. Tiempo de compra.
- E. Costos de los repuestos.
- F. Desviación de plazo de entrega.
- G. Desviación de consumo.
- H. Adquisiciones en curso.
- I. Periodicidad o frecuencia de pedido.
- J. Tasa de falla.
- K. Plazo de entrega.
- L. Demanda de repuestos críticos.
- M. Cantidad de camiones partida 2011.
- N. Cantidad de camiones partida 2015.
- O. Cantidad de camiones partida 2016.
- P. Número de meses promedio desde la última falla partida 2011.
- Q. Número de meses promedio desde la última falla partida 2015.
- R. Número de meses promedio desde la última falla partida 2016.

La identificación de estas variables constituye una fase previa al proceso de selección, ya que a partir de esta identificación se determinarán y seleccionarán mediante un análisis aquellas que son relevantes para el modelo.

### 5.1. Determinación de las variables

Con el propósito de determinar las variables a emplear en el modelo se utilizó el método “Matriz de Impactos Cruzados Multiplicación Aplicada a una Clasificación” (MICMAC),

herramienta de análisis estructural que relaciona, clasifica las variables, con el propósito de identificar las claves, que serán esenciales en la evolución del sistema. La comparación de la jerarquización de las variables en las diferentes clasificaciones, permite confirmar la importancia de algunas, y además, dejar de manifiesto otras que debido a sus acciones indirectas juegan un papel principal. (Pérez Uribe & Vargas, 2015).

El método, se realiza con expertos que poseen experiencia en el área, y se compone de 3 fases: Listado de variables, descripción de relaciones entre variables e identificación de las variables con el MICMAC (Godet, 2007, pág. 64). Para lo anterior se materializó una reunión con especialistas en el área, resultando de lo siguiente:

- A. Listado de variables: a partir de la identificación previa de estas, se procede a su definición, como se presenta en la tabla N° 3.

| N°  | Variable   | Definición  |
|-----|--|---|
| V1  | Stock en bodega.                                   | Cantidad de repuestos disponibles en bodega.  |
| V2  | Nivel de servicio.                                 | Porcentaje de demanda que se espera satisfacer.   |
| V3  | Stock de seguridad.                                | Cantidad de inventario extra para evitar la rotura de stock.  |
| V4  | Tiempo de compra.                                  | Tiempo promedio en las compras desde inicio de compra hasta la adjudicación de la compra.                           |
| V5  | Costos de los repuestos.                           | Cantidad de dinero asociado a la compra de los repuestos.,  |
| V6  | Desviación de plazo de entrega.                    | Medida de dispersión media del plazo de entrega de los proveedores.   |
| V7  | Desviación de consumo.                             | Medida de dispersión media del consumo de los repuestos.  |
| V8  | Adquisiciones en curso.                            | Cantidad de repuestos que se encuentran en proceso de compra, por recibir.  |
| V9  | Periodicidad o frecuencia de pedido.               | Indica el n° de meses entre el pedido al proveedor.   |
| V10 | Tasa de falla.                                     | Valor dimensional que indica la cantidad de fallas por período de mes.  |
| V11 | Plazo de entrega.                                  | Es la frecuencia de fallos expresado en un período de tiempo.   |
| V12 | Demanda de repuestos críticos.                     | El tiempo total que transcurre desde que se emite la orden de compra hasta que el proveedor entrega los productos.  |
| V13 | Camiones partida 2011.                             | Camiones dados de alta año 2011.  |
| V14 | Camiones partida 2015.                             | Camiones dados de alta año 2015.  |
| V15 | Camiones partida 2016.                             | Camiones dados de alta en la Brigada el año 2016.   |
| V16 | Meses promedio desde la última falla partida 2011. | Promedio de meses desde la última falla hasta la fecha de cálculo de la demanda en la partida de camiones año 2011. |
| V17 | Meses promedio desde la última falla partida 2015. | Promedio de meses desde la última falla hasta la fecha de cálculo de la demanda en la partida de camiones año 2015. |
| V18 | Meses promedio desde la última falla partida 2016. | Promedio de meses desde la última falla hasta la fecha de cálculo de la demanda en la partida de camiones año 2016. |

Tabla N°3: "Listado de variables y sus definiciones".

Fuente: Elaboración propia.

B. Descripción de relaciones entre variables: en esta fase se relacionan las variables mediante una escala de 0 a 4 para establecer la influencia entre estas, como se indica en la Tabla N° 4.

| N° | Relación        |
|----|-----------------|
| 0  | No hay relación |
| 1  | Débil           |
| 2  | Mediana         |
| 3  | Fuerte          |
| 4  | Potencial       |

Tabla N°4: “Escala de relación de influencia entre variables”.

Fuente: Godet, M. (2007).

Con esta escala anterior, se elabora la matriz de relación de influencia-dependencia, como se muestra en la Figura N° 7.

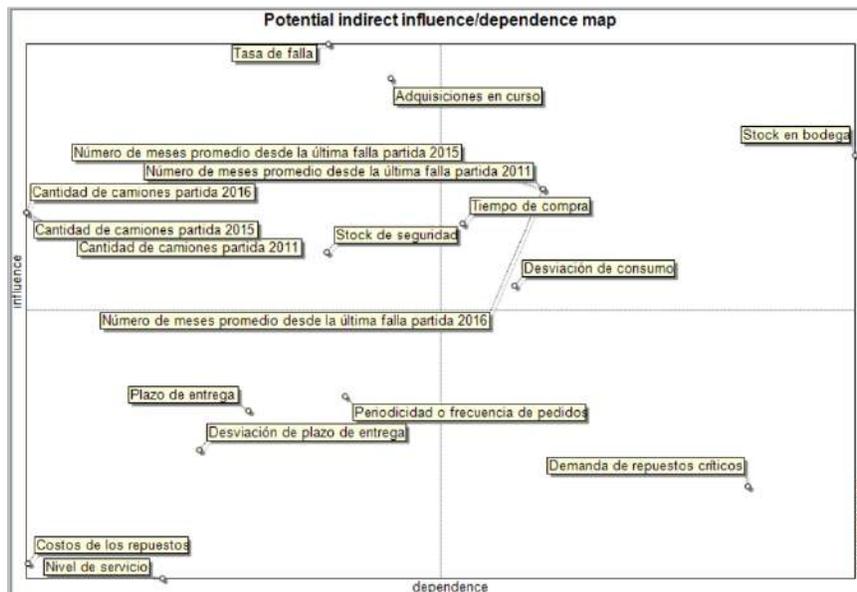


Figura N° 7: “Plano de influencia-dependencia”.

Fuente: Elaboración propia, en software MICMAC (2021).

C. Identificación de las variables: los resultados de las relaciones se representan en un plano de influencia-dependencia en el que se puede visualizar las variables, donde el eje de las abscisas corresponde a la dependencia y el eje de ordenadas a la influencia. Este plano se divide en cinco sectores como se observa en la siguiente Figura N° 8.

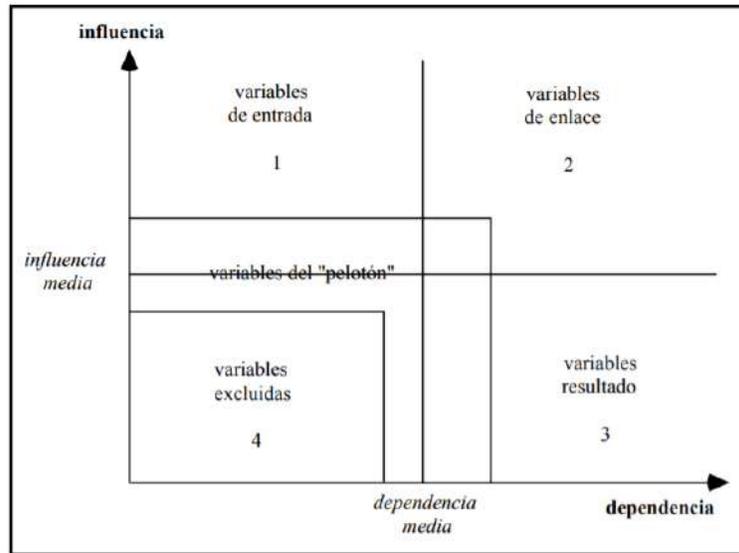


Figura N° 8: “Plano de influencia-dependencia”.

Fuente: Godet, M. (enero de 2007).

Las variables se categorizan según los sectores, como se indica a continuación (Godet, 2007):

Sector 1:

En este sector se agrupan las variables muy motrices y poco dependientes.

Sector 2:

En este sector se agrupan las variables muy motrices y dependientes. Son variables de enlace o claves, ya que cualquier acción sobre estas repercutirá sobre las otras.

Sector 3:

En este sector se agrupan las variables poco motrices y muy dependientes. Son las resultantes, cuya evolución se explica de los sectores uno y dos.

Sector 4:

En este sector se agrupan las variables poco motrices y muy poco dependientes. Pueden ser excluidas del análisis.

Sector 5:

Variables medianamente motrices y/o dependientes.

Luego del ingreso de las relaciones en la matriz del software MICMAC, y con los resultados obtenidos en ella, se observa que la variable N° 2 “Nivel de Servicio” y la variable

Nº 5 “Costos de los repuestos” se identifican como autónomas, por tanto, se pueden excluir del modelo, dado que sus efectos no son tan relevantes.

Por lo tanto, y dado que las variables restantes cumplen una condición relevante en el modelo, en base a lo anterior, las que se proponen son:

- A. Stock de bodega.
- B. Stock de seguridad.
- C. Tiempo de compra.
- D. Desviación de plazo de entrega.
- E. Desviación de consumo.
- F. Adquisiciones en curso.
- G. Periodicidad o frecuencia de pedido.
- H. Tasa de falla.
- I. Plazo de entrega.
- J. Demanda de repuestos críticos.
- K. Camiones partida 2011.
- L. Camiones partida 2015.
- M. Camiones partida 2016.
- N. Número de meses promedio desde la última falla partida 2011.
- O. Número de meses promedio desde la última falla partida 2015.
- P. Número de meses promedio desde la última falla partida 2016.

## **6. MODELO PARA LA SIMULACIÓN DE LA DEMANDA DE REPUESTOS CRÍTICOS CONTROLADOS DEL UNIMOG 4000.**

### **6.1. Recolección de datos**

Respecto a la recolección de datos relativos a las variables seleccionadas, la fuente de información se obtuvo mediante el ERP SIGLE, información que fue trabajada, depurada y exportada al software Excel, conforme a lo siguiente:

- A. Relativo a las fallas: se obtuvo el histórico de las fallas correspondientes a los camiones Unimog 4000 de la unidad seleccionada, desde la fuente del ERP SIGLE, extraídos desde el Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo de la DIVMAN.
- B. Relativo a los tiempos de compra y entrega del proveedor: se obtuvo la información mediante correo con el Oficial de mantenimiento de la respectiva unidad.

### **6.2. Metodología de modelación**

Corresponden a una representación gráfica o matemática de un sistema distributivo de eventos discretos, en ellos se puede describir la topología de un sistema distribuido, como

también paralelo o concurrente. Diferentes disciplinas convergen en esta metodología de modelamiento, entre ellas, la teoría de autómatas, redes y la teoría de grafos.

Una Red de Petri está conformada por los siguientes elementos estructurales: lugares, transiciones, arcos dirigidos y fichas que ocupan posición dentro de los lugares y poseen una axiomática basada en reglas bien definidas.

La definición formal de las Redes de Petri se representa mediante la siguiente Ecuación (Murata, 1989) :

$$PN = (P, T, A, W, M_0)$$

- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  : conjunto finito de transiciones y conjuntos no vacíos.
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  : es el conjunto de arcos. Representan la dirección del flujo de los tokens desde los lugares hacia transiciones y viceversa.
- $W \in [A \rightarrow \{1, 2, \dots, j\}]$  : función de arco. Indica la cantidad de tokens que circulan a través cada arco de la red.
- $M_0 \in [P \rightarrow \{0, 1, \dots, k\}]$  : indica la cantidad de tokens iniciales en la red y los lugares en que se encuentran.
- $P \cap T = \emptyset$  y  $T \cap P = \emptyset$  : indica que los lugares y transiciones son conjuntos disjuntos.

### 6.3. Modelamiento

Mediante una Red de Petri se puede modelar un sistema en evolución (en paralelo o eventos concurrentes) compuesto de varios procesos que cooperan para la realización de un objetivo común.

La construcción del grafo se realiza utilizando la siguiente simbología:



Figura N° 9: “Simbología de construcción”.

Fuente: Milagros C. Pravia, “Redes de Petri en la determinación de puntos críticos para el control interno”, 2016.

## 6.4. Áreas de aplicación

- A. Análisis de datos.
- B. Modelos de simulación con Dinámica de Sistemas.
- C. Diseño de software.
- D. Fiabilidad.
- E. Flujos en sistemas dinámicos.
- F. Programación.

## 6.5. Herramientas de programación

Existen más de 50 tipos de softwares, aplicaciones, librerías y paquetes disponibles para el modelamiento de Redes de Petri, entre ellas:

- A. Integrated Net Analyzer.
- B. CPN Tools.
- C. ARP.
- D. Petri Net Simulator.
- E. Xpetri.

## 6.6. Diseño del modelo predictor matemático para la simulación de la demanda de repuestos críticos controlados del Unimog 4000

El retardo logístico de los repuestos críticos controlados, incluye procesos de las funciones de mantenimiento, obtención y abastecimiento, las que deben interactuar para dar satisfacción a la recuperación del nivel operacional, disminuido producto de la falla de los repuestos críticos controlados, cuya interacción se expresa mediante el siguiente diagrama:

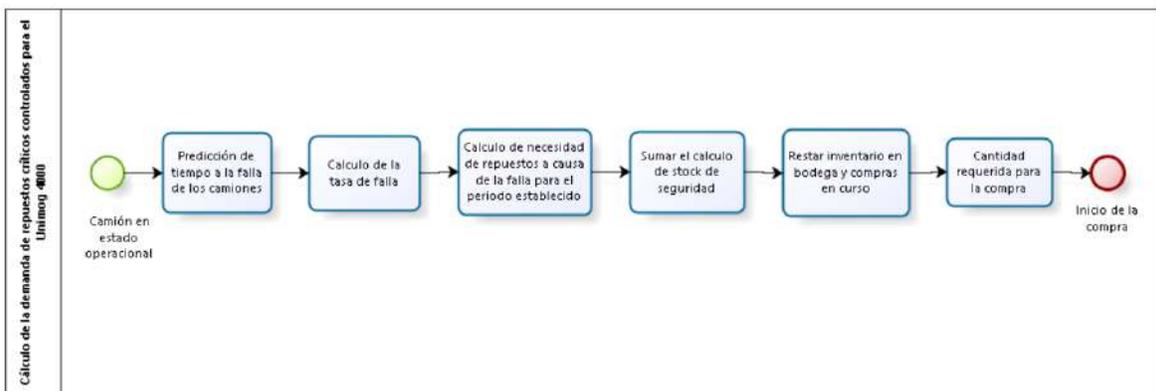


Figura N° 10: “Diagrama del modelo de la demanda de repuestos críticos controlados del Unimog 4000”.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, es necesario aclarar que, para obtener mayor confiabilidad en los resultados, se realizaron varias simulaciones, cuyos resultados comienzan a converger alrededor de las 5.000 (cinco mil) iteraciones, cuya demostración de la convergencia se muestran en el siguiente gráfico:

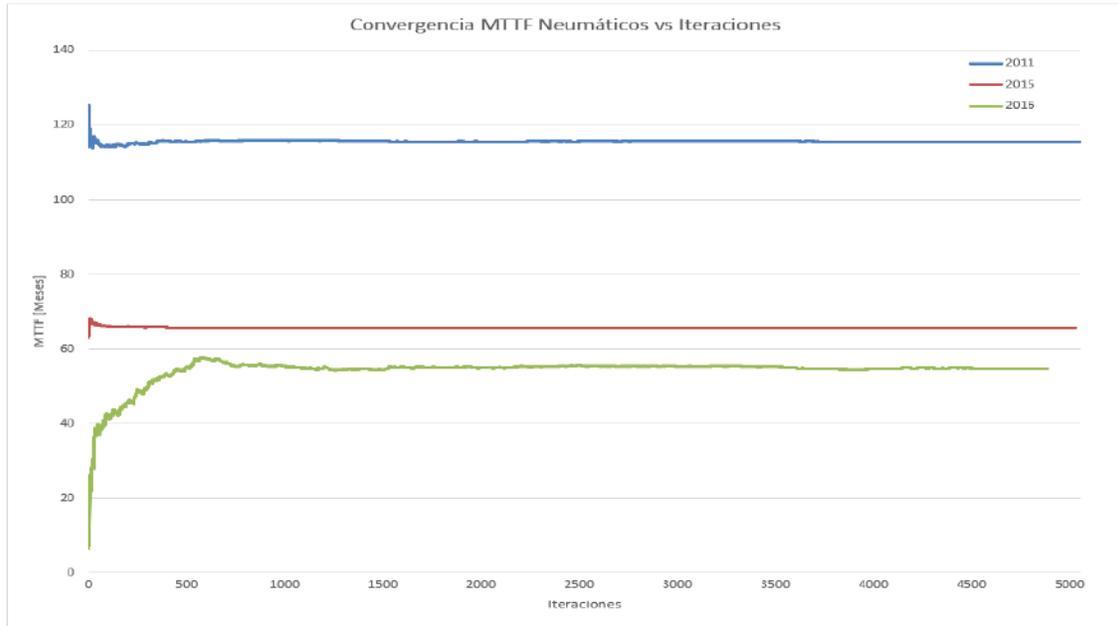


Figura N° 11: "Convergencia MTF neumáticos v/s iteraciones".  
Fuente: Elaboración propia. En software Excel.

Lo anterior, también se realizó con la muestra de datos simulada para las baterías, lo cual se puede observar en la Figura N° 12, presentada a continuación:

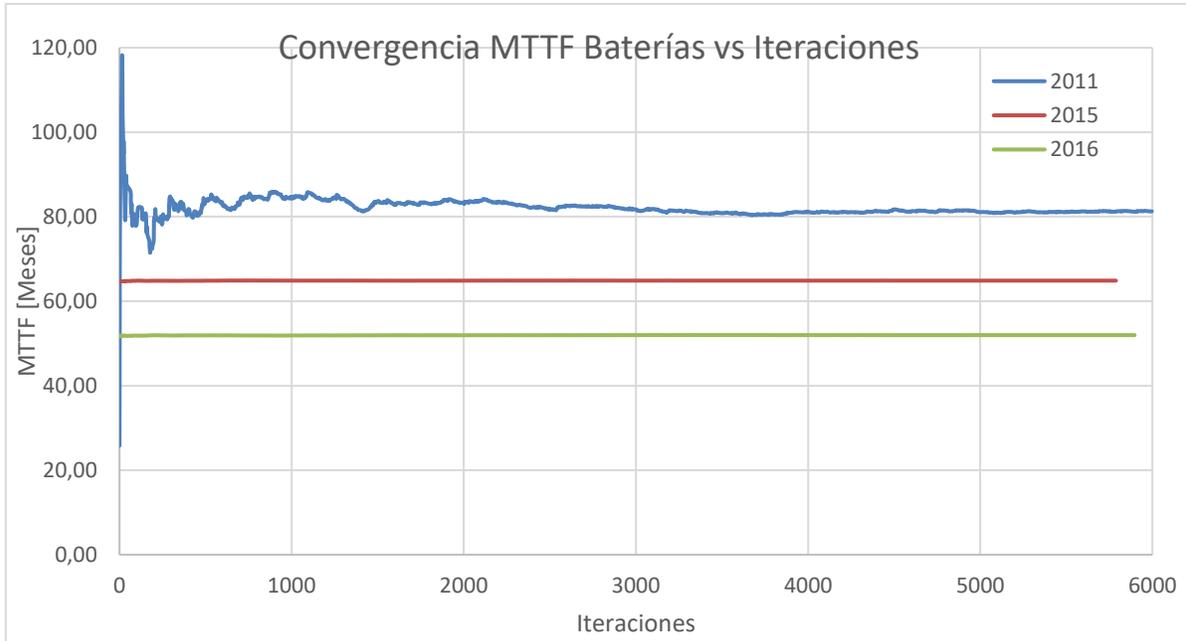


Figura N° 12: "Convergencia MTTF baterías v/s iteraciones".  
Fuente: Elaboración propia. En software Excel.

En la Figura N° 12 se observa que la muestra de datos simulada para los vehículos cuya fecha de partida fue en el año 2015 y 2016 respectivamente la convergencia se logra cerca de las 5000 iteraciones. Por otro lado, para la partida del año 2011, el gráfico comienza a converger cercano a las 6000 iteraciones, lo cual concuerda con la cantidad de iteraciones indicada para los neumáticos.

En conclusión, y para que todos los datos tuvieran un mayor nivel de confianza, se han realizado 6000 iteraciones para cada componente de los vehículos de cada partida.

### 6.7. Representación matemática del modelo

A continuación, se presenta el siguiente ejemplo de muestra, representando una Red de Petri de manera matricial.

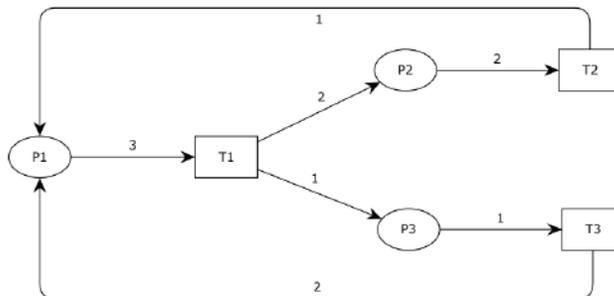


Figura N° 12: "Ejemplo de red de Petri matricial".  
Fuente: Elaboración propia. En software CPN Tools.

$$K = \begin{matrix} & T1 & T2 & T3 \\ P1 & \begin{bmatrix} -3 & +1 & +2 \end{bmatrix} \\ P2 & \\ P3 & \end{matrix}$$

Según la Red de Petri, se crea una matriz de incidencia ( $K$ ), la que representa como afectan las transiciones a la cantidad de tokens que hay en las plazas (o lugares).

Esta matriz, se multiplica por algún vector unitario, el cual definimos como  $u_0$ , que indica las transiciones que se activarán. Además, con la cantidad de tokens iniciales en la red,  $M_0$ , es posible determinar el siguiente estado, es decir la cantidad de tokens que existirán en cada plaza/lugar luego de la activación de la transición. Este estado se llamará  $M_f$ .

Definimos entonces:

$$M_f = \begin{pmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \end{pmatrix}$$

$$M_0 = \begin{pmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$u_0 = \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Para conocer el estado final  $M_f$  se debe seguir la siguiente operación utilizando las reglas de multiplicación de matrices:

$$M_f = M_0 + K * u_0$$

$$\begin{pmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -3 & +1 & +2 \\ +2 & -2 & 0 \\ +1 & 0 & -1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Realizando la operación anterior, considerando que en la plaza P1 existen 5 tokens, en P2 y P3 no hay tokens y que se activa solo la transición T1, la cantidad final de tokens es la siguiente:

$$M_f = \begin{pmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Lo anterior, indica que luego de la activación de la transición T1, los lugares P1, P2 y P3 tienen 2, 2 y 1 token respectivamente.

Esto corresponde a una Red de Petri simple. Para una Red de Petri coloreada, como es la desarrollada en el modelo, la operación anterior se complejiza aún más. En cada celda de la matriz de incidencia  $K$  y de la matriz  $M_0$ , se crea una lista de valores igual a la cantidad de variables en la red.

Para ejemplificar lo anterior, se utilizará una porción de la red desarrollada en este artículo, en la parte inicial, que es donde se realizan ciclos continuos, para generar una muestra de datos.

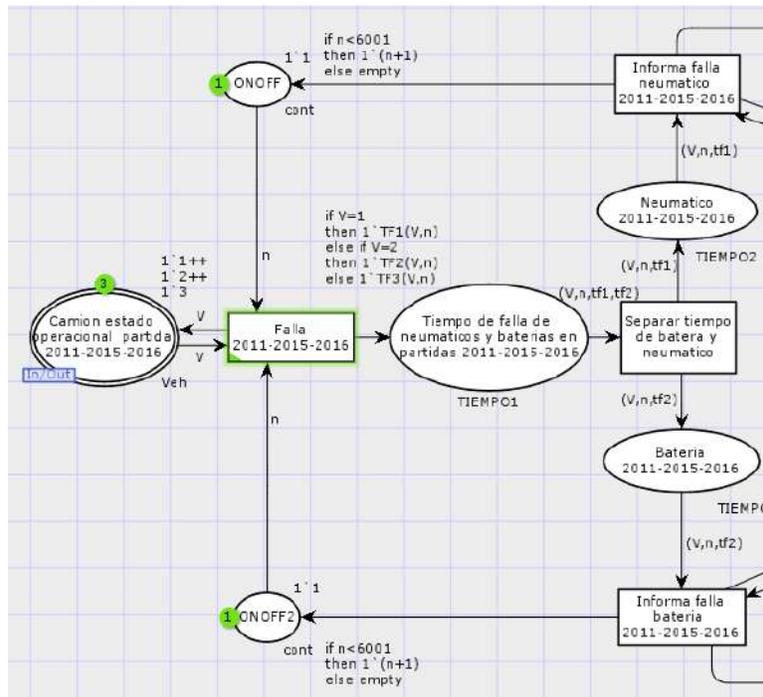


Figura N° 13: "Representación parcial de la subred cálculo de la tasa de falla".  
Fuente: Elaboración propia. En software CPN Tools.

Para facilitar aún más su comprensión, se renombrarán todos los lugares y transiciones, lo que se muestra en la siguiente red, que tiene la misma disposición que la red del modelo.

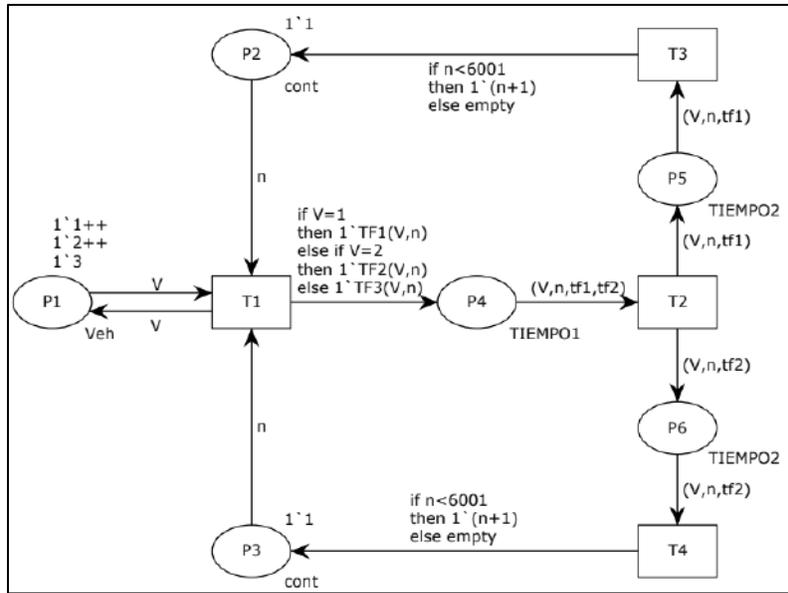


Figura N° 14: "Representación parcial de la subred cálculo de la tasa de falla, renombrada".

Fuente: Elaboración propia. En software CPN Tools.

La matriz de incidencia para esta porción de la red será la siguiente:

$$K = \begin{matrix} & \begin{matrix} T1 & T2 & T3 & T4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \\ P6 \end{matrix} & \left[ \begin{array}{cccc} \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & -n & 0 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{0 & n+1 & 0 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & -n & 0 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{0 & n+1 & 0 & 0\} \\ \{V & n & tf1 & tf2\} & \{-V & -n & -tf1 & -tf2\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{V & n & tf1 & 0\} & \{-V & -n & -tf1 & 0\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{V & n & 0 & tf2\} & \{0 & 0 & 0 & 0\} & \{-V & -n & 0 & -tf2\} \end{array} \right] \end{matrix}$$

En la matriz de incidencia  $K$ , se puede observar que cada celda de la matriz contiene una lista con cuatro elementos, cada una, lo cual concuerda con la cantidad de variables en esta porción de la red, las que son  $V$ ,  $n$ ,  $tf1$  y  $tf2$ . Cada uno de los cuatro espacios que estas listas contienen, corresponden a las cuatro variables antes nombradas y en el mismo orden.

Para comprobar que esta matriz de incidencia funciona, se utilizará el siguiente vector inicial:

$$M_0 = \begin{pmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \\ P6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n & 0 & 0\} \\ \{0 & n & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix}$$

Además, se activará la primera transición utilizando el vector  $u_0$  presentado a continuación:

$$u_0 = \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{1 & 1 & 1 & 1\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix}$$

Utilizando la siguiente ecuación y reemplazando los valores, se obtiene que:

$$M_{f1} = M_0 + K * u_0$$

$$M_{f1} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n & 0 & 0\} \\ \{0 & n & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix} + K * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n & 0 & 0\} \\ \{0 & n & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & -n & 0 & 0\} \\ \{0 & -n & 0 & 0\} \\ \{V & n & tf1 & tf2\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix}$$

$$M_{f1} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & tf1 & tf2\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix}$$

A continuación, se activa la transición T2 presentada por el siguiente vector:

$$u_1 = \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ahora, utilizando la misma ecuación, pero con el nuevo estado inicial  $M_{f1}$ :

$$M_{f2} = M_{f1} + K * u_1$$

$$M_{f2} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & tf1 & tf2\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix} + K * \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & tf1 & tf2\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{-V & -n & -tf1 & -tf2\} \\ \{V & n & tf1 & 0\} \\ \{V & n & 0 & tf2\} \end{pmatrix}$$

Cabe destacar que V puede tomar un valor  $V = \{1,2,3\}$ , mientras que n, puede tomar un valor  $n = \{1,2, \dots, 6001\}$ . Los valores de tf1 y tf2 son generados aleatoriamente por el programa y siguen la distribución exponencial.

$$M_{f2} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & tf1 & 0\} \\ \{V & n & 0 & tf2\} \end{pmatrix}$$

$$M_{f3} = M_{f2} + K * u_2$$

$$u_2 = \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{f3} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & tf1 & 0\} \\ \{V & n & 0 & tf2\} \end{pmatrix} + K * \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & tf1 & 0\} \\ \{V & n & 0 & tf2\} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n+1 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{-V & -n & -tf1 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix}$$

$$M_{f3} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n+1 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & 0 & tf2\} \end{pmatrix}$$

$$M_{f4} = M_{f3} + K * u_3$$

$$u_3 = \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{f4} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n+1 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & 0 & tf2\} \end{pmatrix} + K * \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n+1 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{V & n & 0 & tf2\} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n+1 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{-V & -n & 0 & -tf2\} \end{pmatrix}$$

$$M_{F4} = \begin{pmatrix} \{V & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & n+1 & 0 & 0\} \\ \{0 & n+1 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \\ \{0 & 0 & 0 & 0\} \end{pmatrix}$$

Con todo lo anterior, se expresa la matemática matricial de una parte del modelo, donde se consideró un ciclo completo de las transiciones y lugares. Se representó una porción, debido a que la cantidad de variables presentes en este modelo, complejizan expresar el modelo por completo, de todas maneras, la explicación antes descrita, de querer ser desarrollada por completo con el modelo matemático, se debe replicar, para la totalidad de las subredes, lo que no aportaría en gran medida, para la comprensión y uso del modelo.

### 6.8. Representación del modelo en CPN Tools

Respecto al diagrama de la Fig. N° 4, “Diagrama de Pareto de fallas v/s detenciones de tiempo no programadas”, fue modelado en Redes de Petri Jerarquizadas, cuya representación general se observa en la siguiente figura:

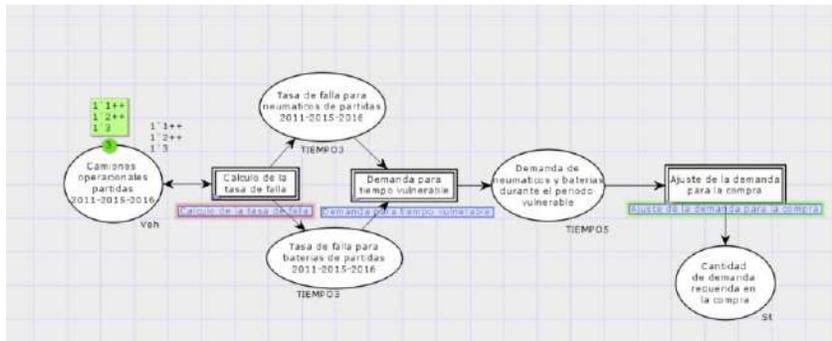


Figura N° 15: " Modelo general para la predicción de la demanda de repuestos críticos controlados del vehículo en estudio".

Fuente: Elaboración propia. En software CPN Tools.

Este modelo representa el algoritmo para el cálculo de la demanda de repuestos críticos controlados del Unimog 4000, con el que se busca obtener como resultado final, la cantidad de repuestos de neumáticos y baterías, con los que será necesario contar, dentro de un período de tiempo establecido por la institución, para satisfacer las necesidades de fallas, junto con recuperar los niveles requeridos de stock de seguridad.

Su inicio, es representado por el lugar “Camiones operacionales partidas 2011-2015-2016”, el que cuenta con 03 (tres) marcas, las que representan a las 03 (tres) partidas de camiones en estudio, de cargo en la Unidad, y cuyas altas se detallan a continuación:

#### A. Camiones del año 2011.

B. Camiones del año 2015.

C. Camiones del año 2016.

Las 03 (tres) marcas, que se encuentran en la condición inicial de estado operacional, dentro del lugar “Camiones operacionales partidas 2011-2015-2016”, donde cambian su condición a falla de los repuestos, al pasar mediante arcos a la subred “Cálculo de la tasa de falla”, donde se generan los tiempos aleatorios de fallas (meses) de los neumáticos y baterías, de forma independiente para cada partida, los que luego se traspasan mediante arcos, información con la que se realiza el cálculo de la tasa de falla, pasando las marcas hacia el lugar “Tasa de falla para neumáticos de partidas 2011- 2015- 2016” y al lugar “Tasa de falla para baterías de partidas 2011- 2015- 2016”, donde se registra las tasas de fallas obtenidas por cada partida para los neumáticos y baterías.

Luego, desde estos últimos dos lugares, mediante arcos separados pasan las marcas con sus registros a la subred “Demanda para tiempo vulnerable”, en donde la tasa de falla, es empleada para calcular la cantidad de neumáticos y baterías, que debieran presentar fallas dentro del periodo de tiempo vulnerable, tiempo que abarca desde la última falla hasta el momento en que se realiza el cálculo de la demanda, más el tiempo del periodo de compra, más el tiempo de demora de entrega por parte de los proveedores y más, la demora del tiempo de compra en la institución, para posteriormente, mediante arcos, alojarse en el siguiente lugar “Demanda de neumáticos y baterías durante el periodo vulnerable”, lugar en donde se almacenan las marcas conteniendo el registro de la cantidad de neumáticos y baterías que presentarán fallas, por cada partida de camiones, durante el periodo vulnerable.

Posteriormente, estas marcas con el registro del lugar anterior, ingresan a la subred “Ajuste de la demanda para la compra”, donde se le suma el cálculo de stock de seguridad de este modelo, obteniendo el total de la demanda que corresponde a las predicción de la falla, más el stock de seguridad que se requiere, a esta suma anterior, se le resta el stock que exista en esos momentos en las bodegas, menos la cantidad de repuestos que puedan existir, correspondiente a compras que se encuentren en curso por recibir, obteniéndose finalmente el resultado de la cantidad de repuestos de neumáticos y baterías que se deben comprar.

El resultado en las marcas anteriores, se pasan al siguiente lugar “Cantidad de demanda requerida en la compra”, donde se obtiene el registro final, correspondiente al cálculo de cuantos neumáticos y baterías se deben comprar para el periodo vulnerable, el que cubre las fallas que posiblemente se generarán, más el reabastecimiento del stock de seguridad en su nivel calculado.

La subred “Cálculo de tasa de falla”, se puede describir con mayor detalle en la siguiente Figura N° 16:

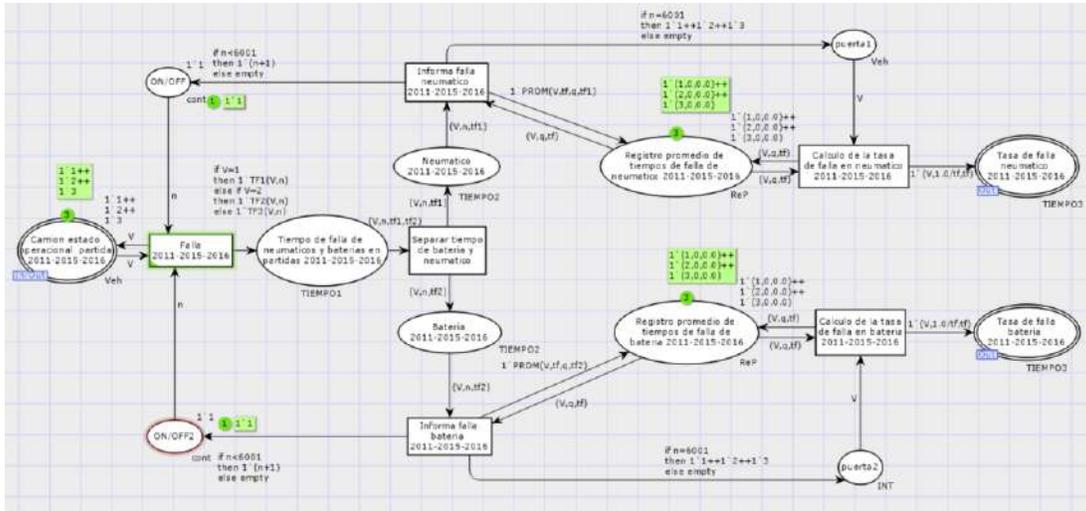


Figura N° 16: " Subred Cálculo de tasa de falla ".

Fuente: Elaboración propia. En software CPN Tools.

En esta Subred, se evalúan las marcas de cada partida, con el propósito de obtener las tasas de fallas de los neumáticos y baterías, mediante una cantidad aleatoria de tiempos de fallas.

Aquí las marcas inician en el lugar “Camión estado operacional partida 2011-2015-2016”, donde a través de sus arcos, las marcas pasan de manera individual y aleatoria, por la transición “Falla 2011-2015-2016”, generándose los tiempos de fallas aleatorios para los neumáticos y baterías, resultado que se registra en el lugar “Registro promedio de tiempos de falla de neumáticos 2011-2015-2016”. Luego, con la transición “Separar tiempo de batería y neumático”, mediante una concurrencia, las marcas pasan a cada lugar, “Neumático 2011-2015-2016” y “Batería 2011-2015-2016”, donde se alojan conforme a su partida de camiones, pero por separado con su tiempo aleatorio de falla.

Posteriormente, ambas marcas pasan por separadas, según su tipo de repuesto (neumático o batería) a través de la transición “Informa falla neumático 2011-2015-2016” e “Informa falla batería 2011-2015-2016”, transiciones que generan reportes hacia 3 lugares mediante sincronización, y de manera aleatoria. De estos 03 (tres) lugares, que se encuentran presentes en las dos transiciones antes mencionadas, un lugar sirve para dar continuidad a las simulaciones hasta una lectura máxima de 6.000 (seis mil) eventos, cerrando con ese número la posibilidad de que se siga generando más simulaciones, el otro lugar, luego de la lectura del evento 6.001 (seis mil uno), permite activar su próxima transición, con la que finalmente se obtendrá el calculo de la tasa de falla. En los terceros lugares, que se encuentran presentes para los neumáticos y baterías, llamado por uno “Registro promedio de tiempos de falla de neumático 2011-2015-2016” y el otro, “Registro promedio de tiempos de falla de batería 2011-2015-2016”, se registran las cantidades totales de eventos aleatorios que se generaron producto de las 6.001 (seis mil uno) simulaciones, de manera independiente por cada partida, y con el promedio de tiempos de falla por separado para los neumáticos y baterías.

Una vez que se tiene esta cantidad de registros, se puede activar las siguientes transiciones “Cálculo de la tasa de falla en neumático 2011-2015-2016” y “Cálculo de la tasa de falla en batería 2011-2015-2016”, donde se realiza el cálculo de la tasa de falla, de manera independiente por partida de camión, tanto en neumático y batería, respectivamente. Estas últimas transiciones, generan el último registro de esta Subred, la que queda alojada en los lugares “Tasa de falla neumático 2011-2015-2016” y “Tasa de falla batería 2011-2015-2016”, los que serán los imput para el siguiente cálculo.

La subred “Demanda para tiempo vulnerable”, que se muestra en la Fig. N° 4., se puede describir con mayor detalle en la siguiente Figura N° 17:

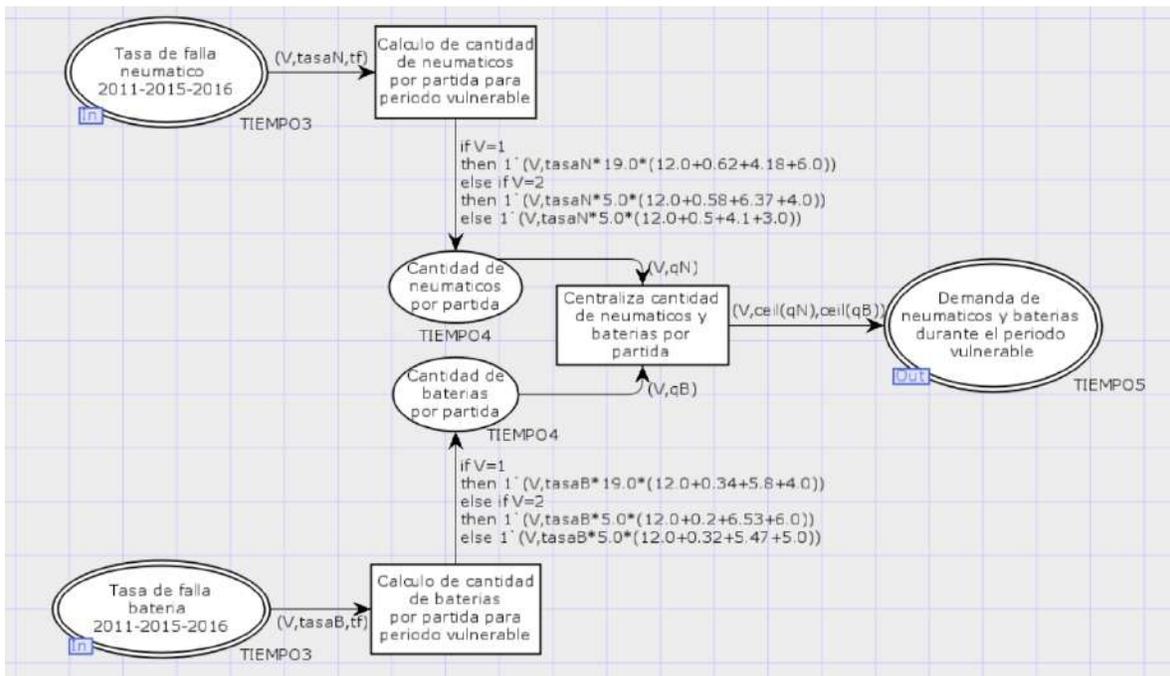


Figura N° 17: " Subred Demanda para tiempo vulnerable ".  
Fuente: Elaboración propia. En software CPN Tools.

En esta Subred, se evalúan las marcas con sus tasas de fallas por cada partida, con el propósito de obtener mediante un cálculo, respecto al tiempo vulnerable, la cantidad de neumáticos y baterías que, según el pronóstico, fallarán durante ese período.

Aquí las marcas inician en los lugares “Tasa de falla neumático 2011-2015-2016” y “Tasa de falla batería 2011-2015-2016”, de ahí pasan a través de sus arcos, de manera individual y aleatoria, por las transiciones “Cálculo de cantidad de neumáticos por partida para período vulnerable” y “Cálculo de cantidad de baterías por partida para periodo vulnerable”, donde la tasa de falla es multiplicada por toda la cantidad del tiempo vulnerable, con lo que se obtiene por resultado la cantidad de repuestos neumáticos y baterías, que por



de stock de seguridad calculado, menos la existencia en bodega y, menos la cantidad de repuestos que se encuentran actualmente en curso de compra, se obtiene el resultado final, correspondiente a la demanda necesaria para comprar, cuya cantidad, cubrirá las fallas que se presenten entre período y período de compra, más la reposición de los niveles de stock de seguridad, necesaria en el almacén, registro que se alojará en el lugar “Cantidad de demanda requerida para la compra”.

La subred “Cálculo inventario de seguridad”, que se muestra en la Fig. N° 411, se puede describir con mayor detalle en la siguiente Figura N° 19:

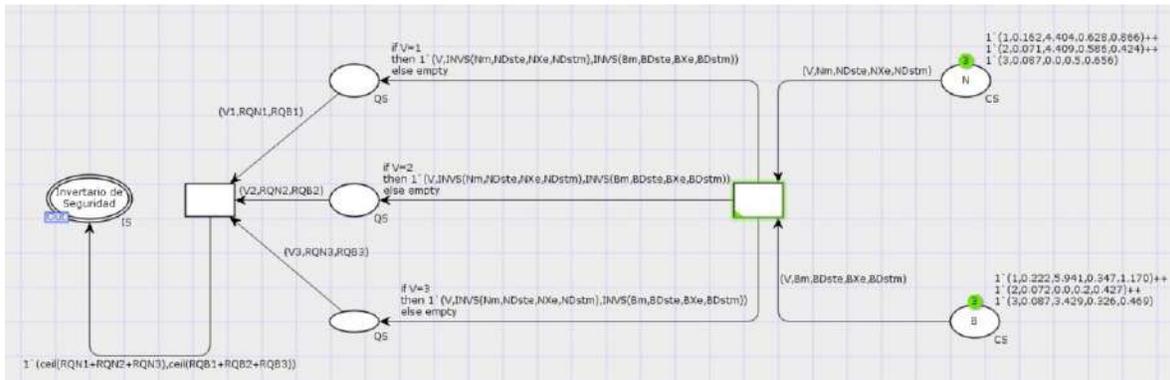


Figura N° 19: " Subred Cálculo inventario de seguridad ".  
Fuente: Elaboración propia. En software CPN Tools.

En esta Subred, se busca obtener mediante el cálculo, la cantidad de inventario de seguridad, que corresponde tener como nivel de stock de seguridad.

Aquí las marcas inician en los lugares “N” y “B”, que corresponden a neumáticos y baterías respectivamente, en cada uno de estos lugares se almacenan 03 (tres) marcas, que contienen las variables del consumo medio mensual, desviación estándar del plazo de entrega mensual, promedio del plazo de entrega y la desviación estándar del consumo mensual, cada uno por cada partida de camiones. Estos 02 (dos) lugares, activan la transición “Cálculo del stock de neumáticos y baterías por partida” mediante sincronización, y allí se genera el cálculo matemático para el stock de seguridad, conforme a la siguiente Ecuación (Gutierrez Ferrin, 2007):

$$S = \sqrt{m^2 \sigma_E^2 + E^2 \sigma_m^2}$$

Posteriormente, mediante convergencia, se agrupan los resultados en 03 (tres) lugares identificados como “SS 2011”, “SS 2015” y “SS 2016”, estos lugares contienen 01 (una) marca por cada partida, que incluye la información del cálculo de stock de seguridad de neumáticos y baterías. Finalmente, por sincronización activan la transición “Suma del Stock

de Seguridad”, donde se suman las cantidades de neumáticos y baterías, quedando registrado en 01 (una) marca, el total de neumáticos y baterías que corresponde al nivel de stock de seguridad requerido, lo cual se registra en el lugar “Inventario de seguridad”.

## 7. SIMULACIÓN DEL MODELO PREDICTOR PARA LA DEMANDA DE REPUESTOS CRÍTICOS CONTROLADOS DEL UNIMOG 4000.

Con datos obtenidos desde el SIGLE, se realizó la simulación del modelo obteniendo resultados que se observan en la siguiente figura:

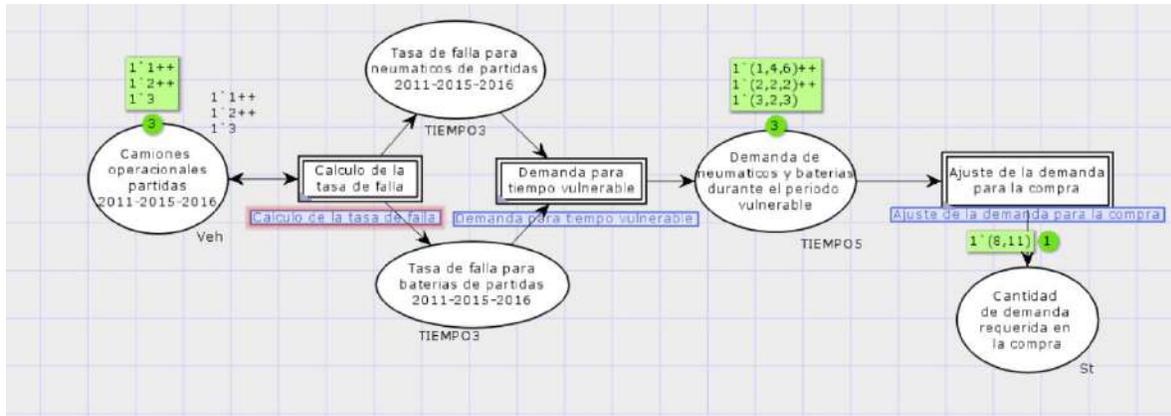


Figura N° 20: " Simulación del modelo predictivo para la determinación de la demanda de repuestos críticos controlados del Unimog 4000 con uso de software CPN Tools".

Fuente: Elaboración propia. En software CPN Tools.

Como se puede observar en la Figura N° 20, los 03 (tres) marcas que representan a las partidas de camiones, mediante la transformación de la información en las distintas transiciones, que generaron resultados en los diversos lugares del modelo, terminan con un resultado de simulación, en que se indica las necesidades a comprar. Para lo anterior, se consideró que las bodegas se encuentran con sus niveles completos de stock, por tanto, el resultado, se cubrirá la demanda ante las fallas que se puedan ocasionar, para el período que se decidió evaluar, que corresponde a 12 meses (entre pedido y pedido), más la demora de los proveedores, en entregar los repuestos de las compras.

### 7.1.1. Escenarios

Se realizó una simulación considerando un escenario desfavorable, y uno favorable, de manera de poder ver como varía el sistema y el comportamiento sobre el cálculo de la demanda de repuestos, y a su vez, el comportamiento que generan las marcas a lo largo del modelo, para contrastarlas con la simulación realizada antes, con los datos proporcionados por la base de datos.

| <b>DETALLE DE LAS CONDICIONES EN CADA ESCENARIO</b> |                         |                            |                               |
|---|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| <b>VARIABLE</b>                                     | <b>ESCENARIO ACTUAL</b> | <b>ESCENARIO FAVORABLE</b> | <b>ESCENARIO DESFAVORABLE</b> |
| <b>Marcas</b>                                       |                         |                            |                               |
| <b>Stock de bodega</b>                              |                         |                            |                               |
| <b>Tiempo de compra</b>                             |                         |                            |                               |
| <b>Tiempo de entrega de proveedores</b>             |                         |                            |                               |

Tabla N°5, "Detalle de escenarios de simulación".

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados que se generaron producto de estos escenarios son registrados en detalle en el siguiente modelo de tabla:

| <b>RESULTADO</b>                       | <b>SIMULACIÓN REAL</b> | <b>SIMULACIÓN ESCENARIO FAVORABLE</b> | <b>SIMULACIÓN ESCENARIO DESFAVORABLE</b> |
|--|------------------------|---------------------------------------|--|
| <b>Demanda para la compra</b>          |                        |                                       |  |
| <b>Demanda de predicción de fallas</b> |                        |                                       |  |
| <b>Cálculo de stock de seguridad</b>   |                        |                                       |  |

Tabla N°6: "Detalle de resultados de simulaciones en escenarios".

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados se pueden consolidar en los siguientes gráficos:

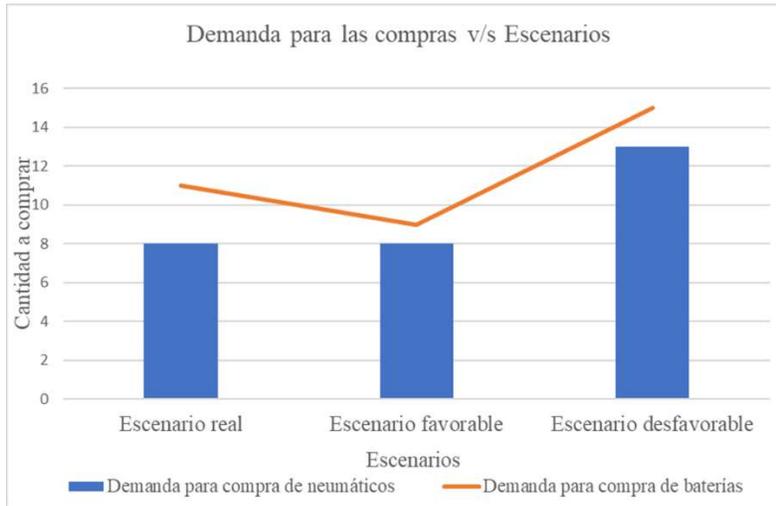


Figura N° 21: " Resultados de escenarios para la demanda de compras".  
Fuente: Elaboración propia. En software Excel.

Por otra parte, se puede observar el comportamiento que se generó, por partida y por tipo de repuesto, la que se expresa en el siguiente gráfico:

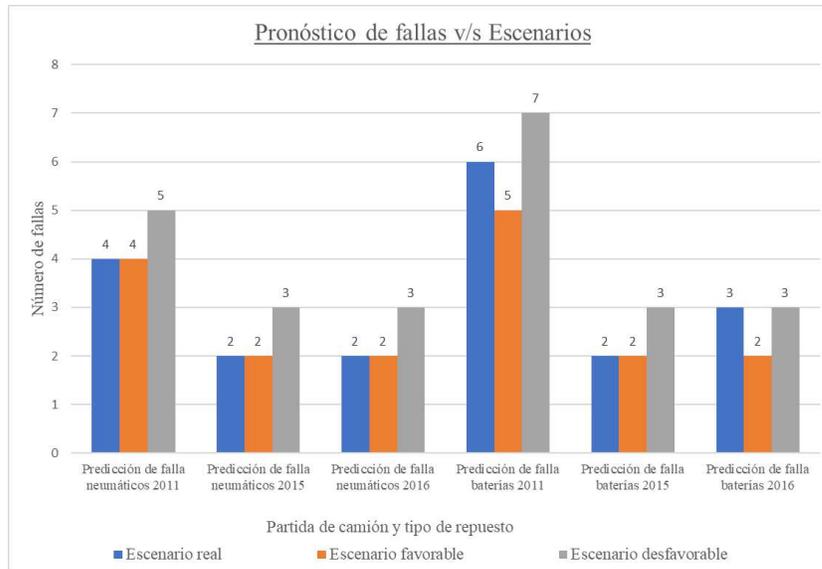


Figura N° 22: " Resultados de escenarios para la demanda de compras por partida de camión y por tipo de repuestos".  
Fuente: Elaboración propia. En software Excel.

Del gráfico anterior, se observa la variación de comportamiento que presentan según cada escenario, evidenciándose que el comportamiento sobre los neumáticos en el escenario

normal y favorable, son los mismos, distinto en el caso de las baterías. A su vez, también se observa que el escenario desfavorable, representa un cambio sustancial, en donde, de generarse esta situación, se observaría un problema para poder cubrir este cambio de la demanda, en un porcentaje bien significativo.

## 8. CONCLUSIONES

Al finalizar el presente trabajo de investigación, se puede concluir que la utilización de las Redes de Petri, es un herramienta útil para la modelación y simulación de eventos, que permite analizarlos de manera discreta, y que para todos aquellos sistemas complejos, como lo son relacionados a la logística, y que se encuentran presentes en nuestra Institución, permiten generar la representación de estos, y obtener resultados relevantes, como los observados en este modelo de demanda de repuestos críticos controlados del Unimog 4000.

De lo anterior, es relevante el poder contar con una fuente de datos confiable, así como quedó en evidencia mediante esta investigación, al ser una base pequeña y de poca confiabilidad, los resultados se alejan de la realidad, no permitiendo generar los ajustes necesarios, prescindiendo en la eventualidad, de los registros futuros, que puedan ser proporcionados, en el SIGLE, con una mayor seguridad y que representen la realidad de las fallas.

Esta investigación puede ser aplicada a la variedad de unidades presentes en el Ejército, siendo una herramienta útil para las futuras decisiones.

Se lograron los objetivos específicos, y con ello el objetivo general, por lo que esta investigación aporta una solución a la actual necesidad de poder definir la demanda de repuestos críticos controlados, basándose en una herramienta de ingeniería, que no demanda costos en recursos monetarios a la Institución, con lo cual, reduciría en un porcentaje el actual retardo logístico para los repuestos críticos controlados del Unimog 4000.

## BIBLIOGRAFÍA

- Godet, M. (enero de 2007). *Prospectiva estratégica: problemas y métodos*. Paris, Francia: Prospektiker.
- Gutierrez Ferrin, A. (2007). *Gestión de stocks en la logística de almacenes. Gestión de stocks en la logística de almacenes*. Madrid, España: FC Editorial.
- Murata, T. (April de 1989). Petri Nets: Properties, Analysis, and Applications. *proceedings of de IEEE*, 77(4), 541-580. doi:10.1109/5.24143

Pérez Uribe, R. I., & Vargas, H. A. (7 de diciembre de 2015). El uso del método MICMAC, para la definición de procesos de intervención en las organizaciones. Bogotá, Colombia: Universidad EAN.