

# Política de Reemplazo de Transformadores de Potencia en una Empresa Tabacalera en la provincia de Salta

Amaya, Oscar Gonzalo<sup>(\*)</sup>; Córdoba, Mario Jesús<sup>(1)</sup>; Mamani, Leonardo<sup>(2)</sup>; Urzagaste, Matías<sup>(3)</sup>; Yurovich, Luis Federico<sup>(4)</sup>; Paiva, Mónica Liliana<sup>(5)</sup>

*Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Salta. Avenida Bolivia N° 5150. Salta. Código Postal 4400. \* oshkaramaya@gmail.com (1) marionet.x10@gmail.com; (2) layonest92@gmail.com; (3) mathhi\_gemm31@hotmail.com; (4) luisyuro\_93@hotmail.com; (5) Monica.Paiva@arcacontal.com*

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un análisis para determinar la política de reemplazo de uno de los transformadores que actualmente utiliza una empresa Tabacalera de la provincia de Salta. El objetivo del mismo es desarrollar un modelo específico de la programación dinámica aplicado al reemplazo de equipos. Para ello se realizó la búsqueda de información técnica y económica de estas máquinas eléctricas, como ser precios de compra, actividades de mantenimiento, costos de mantenimiento, vida útil, etc. Con el procesamiento de esta información y con la construcción del algoritmo matemático se obtuvo como solución el momento o tiempo más favorable para cambiar al transformador relacionado con el presupuesto mínimo necesario. Además se desarrolló un análisis de sensibilidad del modelo, en el cual se observa los cambios que pueden ocurrir en la solución óptima al modificar las variables de decisión. La alternativa que se estableció fue la adquisición de un transformador del tipo seco que, en relación a los convencionales que utilizan aceite como refrigerante, presentan mejoras en términos de costos y de mantenimiento a largo plazo asociado a una mayor eficiencia de trabajo.

**Palabras Claves:** Programación Dinámica, Reemplazo, Mantenimiento, Eficiencia.

## ABSTRACT

In this paper an analysis was performed to determine the replacement policy of one of the transformers currently used by a tobacco company in the province of Salta. The objective is to develop a specific model of dynamic programming applied to equipment replacement. Came true for it the data search of technical and economic information of these electric machines like being purchase prices, activities of maintenance, costs of maintenance, service life, etc. With the processing of this information and with the construction of the mathematical algorithm were obtained like solution the moment or more favorable time to change the transformer pertaining to the minimal necessary presupposition. Besides himself development a sensitivity analysis of the model, in the one that one observes the changes that can happen in the optimal solution to modify the variables of decision. The alternative that became established was the acquisition of a transformer of the dry type than, in relation to the conventional that utilize oil like refrigerant, present improvements in terms of costs and of maintenance to long term correlated a bigger efficiency of work.

**Key words:** Dynamic programming, Replacement, Maintenance, Efficiency.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la investigación de operaciones no se cuenta con una técnica general para resolver todos los modelos que puedan surgir en la práctica: el tipo y complejidad del modelo matemático determina la naturaleza del método de solución.

Se desarrolló un caso de estudio dentro de una empresa tabacalera, cuya problemática era la decisión de cambiar o conservar un transformador eléctrico. Para poder abordar el problema detectado, se utilizó como herramienta la programación dinámica, metodología en la cual el problema puede descomponerse en sub-problemas más pequeños. Se debe optimizar cada sub-problema para utilizar esta solución óptima como dato de entrada para el siguiente. Al resolver el último sub-problema se obtiene una solución óptima que es global para todo el problema. La selección de este modelo matemático se debe a la necesidad de predecir las distintas situaciones económico-financieras que pueden ocurrir a lo largo de la vida útil de la máquina según las decisiones tomadas en cada año de trabajo de la empresa.

### **1.1. EMPRESA TABACALERA**

El estudio del caso se realizó en una empresa tabacalera Internacional, situada en la localidad de El Carril, Provincia de Salta. Es una empresa líder que comercia la hoja de tabaco independiente a fabricantes de cigarrillos del mundo. Selecciona, compra, procesa, empaca y almacena hoja de tabaco. En algunos mercados en desarrollo, también ofrece conocimientos de agronomía y la financiación para el cultivo de tabaco en hoja. No fabrica ni vende cigarrillos u otros productos del tabaco para el consumo. Como un comerciante que lleva el tabaco en hojas independientes, proporciona servicio a nivel mundial para los fabricantes de cigarrillos. Sus ingresos se componen principalmente de la venta de tabaco y honorarios cobrados por los servicios relacionados a los fabricantes de productos de consumo de tabaco en todo el mundo.

### **1.2. PROBLEMA A ANALIZAR**

Decidir si se procede a cambiar o a conservar uno de los transformadores con mayor antigüedad que utiliza la empresa para desarrollar su actividad.

#### **1.2.1 PLANTEO DEL PROBLEMA Y BÚSQUEDA DE DATOS**

La tabacalera desea desarrollar una política de reemplazo para renovar un transformador de distribución de 1500 kVA de 28 años de uso. Una empresa encargada de fabricarlo estipula una vida útil de 35 años aproximadamente. El precio actual de compra es de U\$S28.400 y se incrementa un 2% anualmente (dato obtenido del Índice de Precios Internos al por Mayor (IPIM): INDEC). El precio de venta por desecho es de U\$S12.300 y disminuye un 5% (estimación de la variación precio de venta de transformadores usados en páginas de internet de ventas de usados) por año. El mantenimiento que se realiza es anual, y para ello se ocupan 8 operarios (4 técnicos en dos turnos, cuya jornada laboral es de 8 horas por turno, y el día planificado es aquel en donde finaliza la época de cosecha de las hojas de tabaco), los cuales tienen una remuneración de U\$S200 (\$2880) por turno que adquieren al finalizar el mismo y el costo por el cambio de aceite se detalla en la Tabla 1, al momento del reemplazo se espera un año de vida para iniciar el mantenimiento. Se realizará un estudio a futuro de 10 años (empieza del año 2016 hasta el año 2025).

Tabla 1: Costos de mantenimiento en función de la Vida Útil.

Mantenimiento	Precio (Dólares)	Frecuencia de Acción (Años)	Frecuencia de Acción al cumplir la Vida Útil (Años)
Ensayos sobre el aceite previo y post ensayos.	US\$ 145,21	1	1
Toma de muestras de aceite aislante (hasta 5 muestras).	US\$ 40,94	1	1
Medición de rigidez dieléctrica con espinterómetro según IRAM 2341. Sin transporte.	US\$ 6,08	1	1
Medición de acidez orgánica según ASTM D-974. Sin transporte	US\$ 4,56	1	1
Medición de tangente delta según IRAM 2340. Sin transporte.	US\$ 13,69	1	1
Medición de p.p.m. de agua en aceite según ASTM D-1355. Sin transporte.	US\$ 7,61	1	1
Cromatografía gaseosa y contenido de gases (%). Sin transporte.	US\$ 19,78	1	1
Secado del tranfo por método de Hot Oil Spray o similar. Incluye el desencubado previo y posterior al tratamiento. Incluye cambio de juntas.	US\$ 27.461,97	-	1
Cambio aceite transf. hasta 15000 lts.	US\$ 889,79	3	1
Deshidratado o desgasado de aceite aislante en transformadores de hasta 15000 lts.	US\$ 753,45	3	1

Fuente: Elaboración propia a partir del listado de precios que ofrece la empresa que brinda Mantenimiento.

## 2. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO.

### 2.1. PRORAMACIÓN DINÁMICA: SU NATURALEZA RECURSIVA

La idea principal de la programación dinámica es descomponer el problema en sub-problemas más manejables. Los cálculos se realizan entonces recursivamente donde la solución óptima de un sub-problema se utiliza como dato de entrada al siguiente problema. La solución para todo el problema está disponible cuando se soluciona el último sub-problema. La forma en que se realizan los cálculos recursivos depende de cómo se descomponga el problema original. Normalmente los sub-problemas están vinculados por restricciones comunes. La factibilidad de estas restricciones comunes se mantiene en todas las iteraciones [1,2].

#### 2.1.1. MODELO DE REEMPLAZO DE EQUIPO

Las máquinas que permanecen mucho tiempo en servicio incurren en un alto costo de mantenimiento y pueden ser reemplazadas después de una cierta cantidad de años en operación. La situación tiene que ver con determinar la edad más económica de una máquina. Supongamos que el problema de reemplazo de una máquina abarca "n" años Figura 1. Al inicio de cada año, una máquina o se mantiene en servicio un año más, o es reemplazada por una nueva. Sean  $r(t)$ ,  $c(t)$  y  $s(t)$  el ingreso anual, el costo de operación y el valor de desecho, respectivamente, de una máquina de "t" años. El costo de adquisición de una máquina nueva en cualquier año es  $l(t)$ .

Los elementos del modelo de PD son los siguientes:

- La etapa  $i$  está representada por el año  $i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .
- Las alternativas  $X_i$  en la etapa (año) " $i$ " son conservar (K) o reemplazar (R) la máquina al inicio del año  $i$ .
- El estado en la etapa " $i$ " es la edad de la máquina al inicio del año  $i$ .

Dado que la máquina tiene  $t$  años al inicio del año  $i$ , se define  $f(t)$  = ingreso neto máximo en los años  $i, i + 1, \dots, y n$ , con lo cual se tienen las ecuaciones recursivas para la etapa " $n$ " Ecuación (1) y las etapas " $i$ " Ecuación (2) con  $i = 1, 2, \dots, n-1$ .

$$F_n(t) = \text{máx}\{[r(t) - c(t) + s(t+1), \text{ si } X_n = K]; [r(0) + s(t) + s(1) - l(t) - c(0), \text{ si } X_n = R]\} \quad (1)$$

$$F_i(t) = \text{máx}\{[r(t) - c(t) + f_{i+1}(t+1), \text{ si } X_i = K]; [r(0) + s(t) - l(t) - c(0) + f_{i+1}(1), \text{ si } X_i = R]\} \quad (2)$$

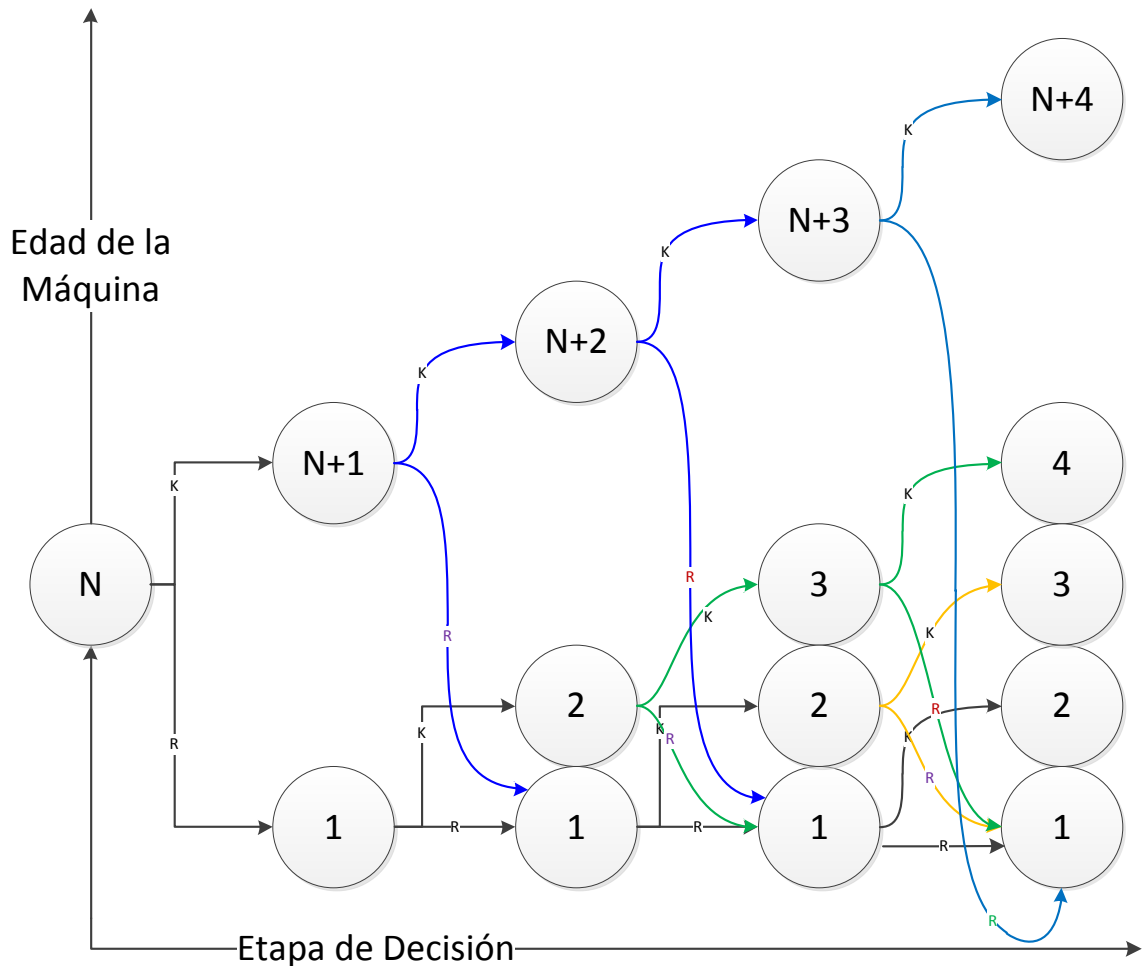


Figura 1 Diagrama de Nodos que relaciona las etapas y los estados en el Modelo de Cambio de Equipo

## 2.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

- Etapas (t): Años "i" siguientes a la vida útil actual del transformador.
- Decisiones (X<sub>i</sub>): se conserva (K) o se reemplaza (R) el transformador al principio del año i.
- Estado (S<sub>i</sub>): Edad del transformador al inicio del año "i" Figura 2.
- Función recursiva: Con los datos obtenidos se procede a formular los componentes I(t) Ecuación (3), s(t) Ecuación (4) y c(t), obteniendo la función recursiva f<sub>i</sub>(t) Ecuación (5). El término c(t) está compuesto por la remuneración de los operarios asignados (U\$S 1600) y las acciones de mantenimiento a realizar en base a los años de vida útil del transformador. Se destaca que en el caso particular de los transformadores, la función tomará valores mínimos en las etapas por ser una máquina que no está directamente relacionada con el sistema productivo, razón por la cual no existe el término r(t) del ingreso.

$$I(t) = \text{U}\$S 28400 * (1 + (t-1)*0,02) \quad (3)$$

$$s(t) = \text{U}\$S 12300 * (1 - (t-1) * 0,05) \quad (4)$$

$$f_i(t) = \text{mín.} \{ X_i = K \rightarrow f_i(t) = c(t) + f_{i+1}(t) ; X_i = R \rightarrow f_i(t) = I(t) - s(t) + f_{i+1}(t) \} \quad (5)$$

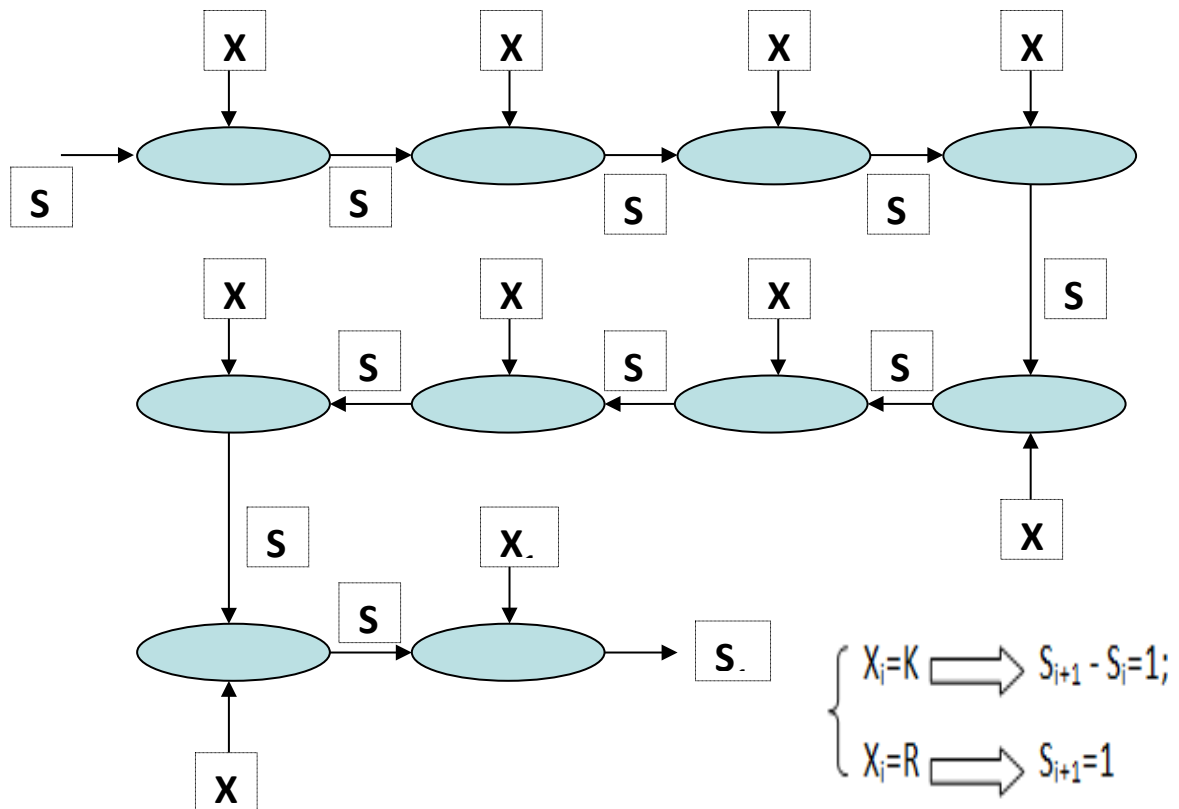


Figura 2 Diagrama de Flujo del Modelo

### 2.3. RESOLUCIÓN DEL MODELO

Debido a que la variable de decisión  $X_i$  es del tipo lógica, se ha utilizado el software Microsoft Excel como se muestra en Tabla 2, definiendo los valores de celdas según la Ecuación (5). Luego se selecciona el mínimo valor entre las celdas de las columnas K y R para tener el óptimo de cada estado S con su respectiva decisión para cada etapa. Estas soluciones se relacionan con la siguiente etapa mediante las condiciones de vínculo Figura 2. Al llegar a la última etapa se obtiene la solución óptima global que resuelve el problema Tabla 3. La política de reemplazo resultará de agrupar los óptimos de cada etapa vinculados a la solución final global Figura 3.

Tabla 2: Cálculo de valores óptimos en etapa 10.

Etapa (t)	10				
s	K	R	F(t)	Decisión	
1	1837,87	26747	1837,87	K	
2	1837,87	26747	1837,87	K	
3	3626,32	26747	3626,32	K	
4	1837,87	26747	1837,87	K	
5	1837,87	26747	1837,87	K	
6	3626,32	26747	3626,32	K	
7	1837,87	26747	1837,87	K	
8	1837,87	26747	1837,87	K	
9	3626,32	26747	3626,32	K	
37	31088,29	26747	26747	R	

Tabla 3: Cálculo de la solución óptima global en etapa 1.

Etapa (t)	1				
s	K	R	F(t)	Decisión	
28	66651,15	38006,18	38006,18	R	

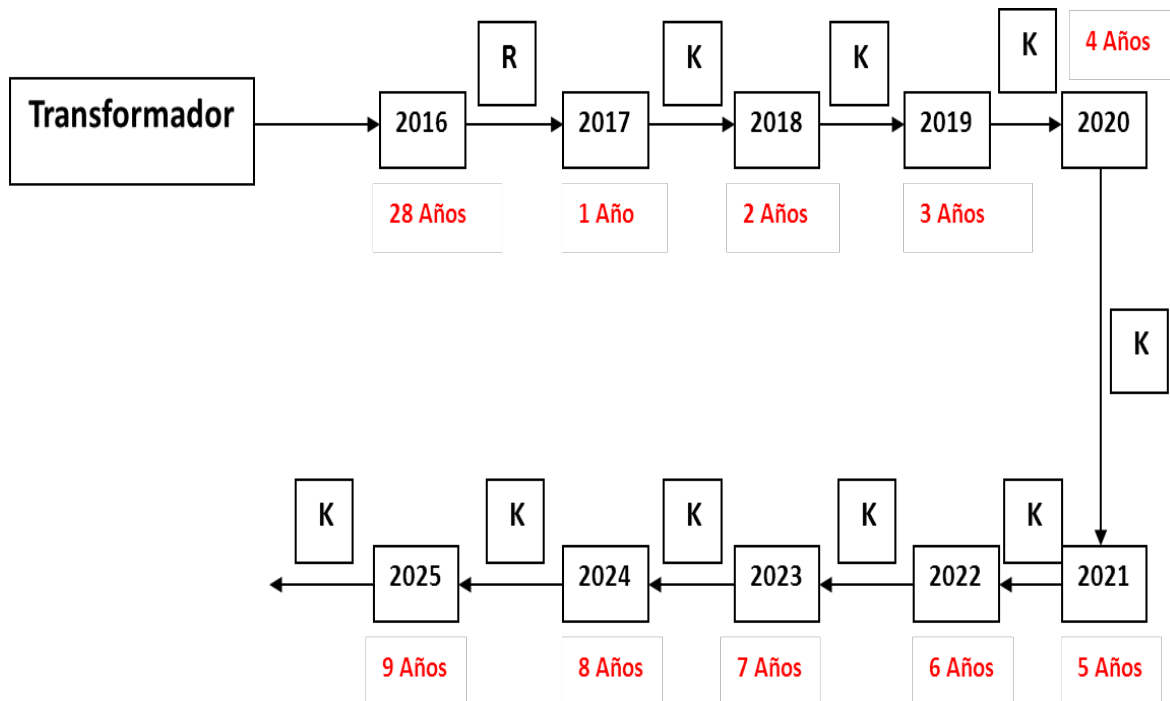


Figura 3 Política de Reemplazo

## 2.4. SOLUCION ÓPTIMA

La política de reemplazo que debe adoptar la Tabacalera es reemplazar el transformador, cuya vida útil es de 28 años, en este año (2016) debido a que los costos de mantenimiento futuros son excesivos. Al reemplazarlo por un transformador nuevo del mismo tipo (ONAF) en este año se tendría un costo de mantenimiento futuro de U\$S 38006,18 y la máquina eléctrica tendría una vida útil de 9 años hasta el año de proyección (2025) Figura 3.

## 3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Se analizará la posibilidad de que la Tabacalera opte por la compra de un transformador de distribución seco de 1500 kVA para reemplazar el transformador de distribución ONAF (usa aceite para la refrigeración) de 28 años. Los transformadores secos son prácticamente libres de mantenimiento, pero requieren una serie de atenciones importantes para su normal funcionamiento (recaudos que los 8 operarios seleccionados para la rutina de mantenimiento pueden realizar):

- El polvo que se deposita en gran cantidad en las partes del transformador juega un papel de aislante térmico. La temperatura del aparato aumenta, por tal motivo es necesario realizar una limpieza regular. Esta limpieza se realiza con solventes dieléctricos y con artefactos de aspiración (no por soplado).
- Control de las termocuplas que miden las temperaturas del núcleo y de los arrollamientos.
- Verificación del funcionamiento de la ventilación forzada.
- Ajuste general del aparato. Principalmente del sistema de sujeción de los bobinados y bornes, tanto de alta como de baja tensión.
- Medición y análisis de posibles fallas mediante termografía infrarroja.
- Control de la no presencia de humedad en el local.

### 3.1. TRANSFORMADORES SECOS

Traen una serie de ventajas a largo plazo:

#### ❖ Seguridad:

- Son seguros, confiables, eficientes y amigables con la naturaleza.
- No se queman y ante un incendio externo, se auto-extinguen. Sin humos tóxicos.
- No hay riesgos de explosión.
- Se pueden instalar incluso en los techos o entre pisos de un edificio.

#### ❖ Retorno de inversión:

- No requieren grandes mantenimientos, son resistentes a la corrosión y la humedad.
- Tienen menores dimensiones y pesos.
- No requieren fosos de contención de fluidos y construcciones civiles especiales.
- Reducción de costos de seguros.
- Reducción de costos con cables de baja tensión y de pérdidas en la instalación.
- Agregando ventilación forzada se puede aumentar la potencia hasta un 40%.

- Alternativa con pérdidas reducidas por lo que el retorno de la inversión se realizará en menor tiempo y ahorran energía.
- Posibilidad de ensamblar o reemplazar bobinados en el sitio.

### 3.2. INCLUSIÓN DE NUEVOS DATOS EN EL MODELO

El precio actual de compra de los transformadores secos es de U\$S52.000 y se incrementa un 2% anualmente (dato obtenido del Índice de Precios Internos al por Mayor "IPIIM": INDEC). El precio de venta por desecho es de U\$S22.000 y disminuye un 1% por año y del transformador ONAF a cambiar es de U\$S12.300 y disminuye un 5% por año (estimaciones en las variaciones de precios de desechos de transformadores usados). El costo de mantenimiento anual del transformador en seco estaría compuesto únicamente del pago de U\$S200 por turno a cada uno de los 8 operarios seleccionados, que reciben al finalizar el mismo.

### 3.3. MODIFICACIÓN DEL MODELO

Se cambiara el término  $I(t)$  para indicar el precio de los transformadores secos Ecuación (6), se conservara el término  $s(t)$  Ecuación (4) y se fijara el valor de  $c(t)$  Ecuación (7) para indicar el costo de mantenimiento del transformador ONAF en uso. Además se adicionarán los términos  $s_1(t)$  Ecuación (8) y  $c_1(t)$  Ecuación (9) para destacar el precio de desecho del transformador seco y su mantenimiento en caso de conservar respectivamente.

$$I(t) = U\$S 52000 * (1 + (t-1) * 0,02) \quad (6)$$

$$c(t) = U\$S 29488,29 + U\$S 1600 \quad (7)$$

$$s_1(t) = U\$S 22000 * (1 - (t-1) * 0,01) \quad (8)$$

$$c_1(t) = U\$S 1600 \quad (9)$$

Se respetaran las consideraciones ya expuestas al armar la función recursiva, pero según el valor que tenga el estado " $S_i$ " la función cambiara para cada alternativa " $X_i$ " Ecuaciones 10 a 13.

$$f_i(t) = c(t), \text{ si } X_i = K \text{ cuando } S_i \geq 28 \text{ años} \quad (10)$$

$$f_i(t) = c_1(t), \text{ si } X_i = K \text{ cuando } 1 \text{ año} \leq S_i < 28 \text{ años} \quad (11)$$

$$f_i(t) = I(t) - s(t), \text{ si } X_i = R \text{ cuando } S_i \geq 28 \text{ años} \quad (12)$$

$$f_i(t) = I(t) - s_1(t), \text{ si } X_i = R \text{ cuando } 1 \text{ año} \leq S_i < 28 \text{ años} \quad (13)$$

Resolviendo nuevamente con el software Microsoft Excel y realizando los mismos procedimientos que en el apartado 2.3, se obtiene el plan óptimo para esta situación Tabla 4 y la política de reemplazo Figura 4.

Tabla 4: Cálculo de la solución óptima global en etapa 1 de la nueva situación.

Etapa (t)	1	s	K	R	F(t)	Decisión
		28	85243,29	54100	54100	R

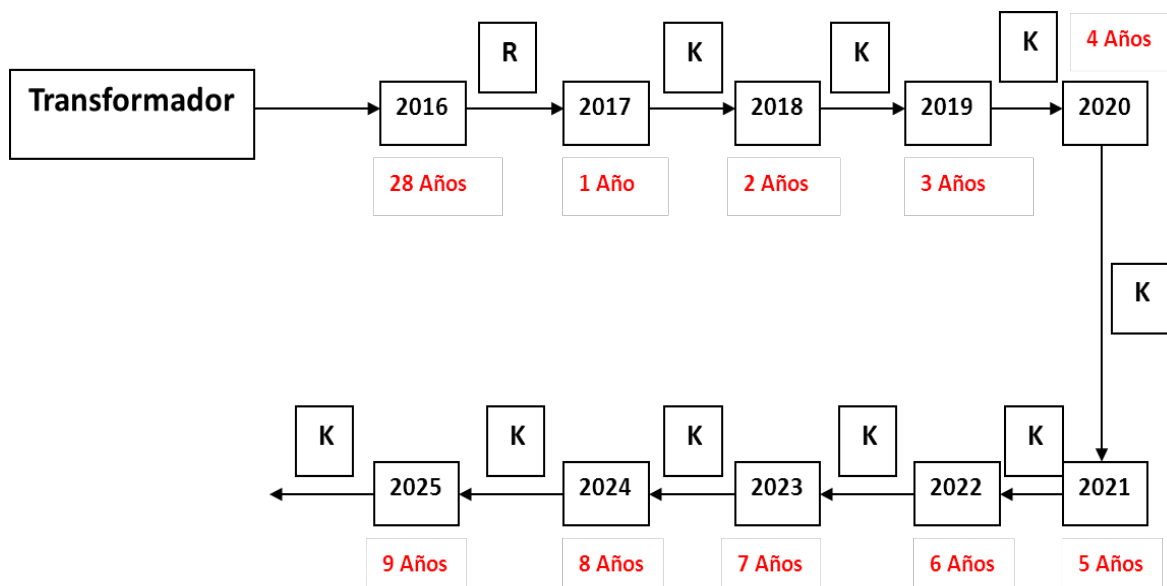


Figura 4 Política de Reemplazo de la nueva situación

### 3.4. SOLUCIÓN ÓPTIMA DE LA ALTERNATIVA PROPUESTA

La política de reemplazo del transformador no es afectada por el cambio en el tipo de transformador a comprar: reemplazar el transformador, cuya vida útil es de 28 años, en este año (2016) debido a que los costos de mantenimiento futuros son excesivos. Al reemplazarlo por un transformador nuevo del mismo tipo seco en este año se tendría un costo de mantenimiento futuro de U\$S 54100 y la máquina eléctrica tendría una vida útil de 9 años hasta el año de proyección (2025). Este costo estimado es mayor que el que se tendría en caso del reemplazo por un transformador ONAF.

### 4. CONCLUSIONES

Con este estudio se pudo evidenciar la importancia de una de las aplicaciones de la Programación Dinámica destinada a las necesidades de reemplazar una máquina utilizada en una empresa proyectando acciones futuras y determinando el período que tenga el menor costo para realizar el reemplazo. Gracias al método se pudo establecer la política de reemplazo deseada, indicando el año más favorable para el cambio del transformador de mayor antigüedad por otro, ya sea del tipo convencional (ONAF) o del tipo seco como alternativa. Estas soluciones son válidas debido a que esta herramienta matemática proporciona los fundamentos necesarios para la toma de decisiones en situaciones que requieren predicciones en el tiempo.

Los transformadores a pesar de ser considerados máquinas casi perfectas por su alto rendimiento mecánico (95% aproximadamente) deben ser reemplazados al cumplirse su vida útil debido a los costos de mantenimiento que crecen porque poseen un sistema de refrigeración que utiliza aceite como fluido de trabajo. Sería una buena inversión la elección de los transformadores secos, pero el presupuesto requerido para su compra es el doble que el presupuesto destinado para un transformador ONAF, además esto es decisión exclusiva de la empresa.

### 5. REFERENCIAS

- [1] Taha, Hamdy. 2012. *Investigación de Operaciones*. México. Novena Edición. Editorial Pearson. Impreso en México.
- [2] Hillier, Frederick; Lieberman, Gerald. 2010. *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México. Novena Edición Editorial McGraw-Hill. Impreso en México.

### Agradecimientos

Queremos agradecer a las Ingenieras Mónica Paiva y Silvana Castillo por el apoyo, motivación y asesoramiento para realizar esta tarea investigativa.

Además agradecemos al personal del área de mantenimiento de la empresa tabacalera de Salta:

- a Nancy Soria (jefa de RRHH) por su disposición y coordinación y por haberme recibido en primera instancia y comunicado con los ingenieros del departamento de producción.
- al Ingeniero Jefe de Producción Gustavo Córdoba por recibirnos en su oficina en la primera visita.
- al Ingeniero Barrionuevo por orientarnos en como buscar los datos de Edesur.
- al Sr. Mario Cesar Córdoba, operario del área de mantenimiento, por transmitirnos sus 20 años de experiencia dentro de la fábrica, por explicarnos los detalles de su funcionamiento y por decirnos que y a quien preguntar cada cosa.