

## TEORÍA DE LOS JUEGOS PARA LA PLANIFICACIÓN DE MANTENIMIENTO

**Antecedente:** La teoría de los juegos [1] busca encontrar alternativas con soluciones que dan ganancias o pérdidas a los jugadores en función de las decisiones que se toman, algunas veces las decisiones de un individuo o grupo se ven influencias por su conocimiento, experiencia, pero también pueden agregarse variables aleatorias como es la condición actual de mercado, la necesidad creciente de un cliente importante, o el momento económico. Por ello es muy difícil tener un consenso único y que sea fácilmente obtenido con pocas revisiones o reuniones entre los interesados. En la Empresa tenemos que estar en constante revisión de las condiciones de mercado, hídricas, climáticas, de economía para poder proceder con los cortes de energía en las líneas de transmisión para el necesario mantenimiento de las torres, cadenas de aisladores, sistemas y estructuras; para que se garantice la confiabilidad de los activos, los cuales son en buena parte recibidos por una concesión del Estado y con muchas décadas de operación en el sistema peruano.

Para poder plantear un plan de largo plazo, en el Perú hacemos revisiones semestrales y en el mes de agosto a noviembre se revisa el plan del año siguiente, tomando solo como referencias las condiciones de ese momento, esto causa en el futuro unos cambios en fechas e inclusive cancelaciones debido a la imposibilidad de indisponer líneas o celdas [2]. Esto provoca una situación en la que la instalación no se mantiene y se considera un cierto riesgo, el arte está en

cuantificar el riesgo [3] y expresarlo en tiempo y montos, tiempo para poder presentar una fecha de postergación que sea lo más razonable posible y el monto para entender el impacto económico de una cancelación o prorroga de mantenimiento programado.

**Teoría de los Juegos de Nash.** - La Teoría de Juegos se desarrolló con el simple hecho de que un individuo se relacionara con otro u otros. Hoy en día es fácil enfrentarse cotidianamente a esta teoría, en cualquier momento, tenemos por ejemplo cuando nos inscribimos en un nuevo semestre en la universidad, cuando la directiva toma la decisión sobre el monto que se va a cobrar, la directiva está realizando un juego con sus clientes, en este caso los alumnos. Para el hombre la importancia que representa la Teoría de Juegos es evidente, pues a diario se enfrenta a múltiples situaciones que son juegos.

Actualmente la Teoría de Juegos se ocupa sobre todo de qué ocurre cuando los hombres se relacionan de forma racional, es decir, cuando los individuos se interrelacionan utilizando el raciocinio.

**Marco Conceptual:** En el Departamento de Transmisión Norte se atienden 16 subestaciones con frecuencias de mantenimiento que originan más de 1000 órdenes de mantenimiento, más de 2600 avisos de mantenimiento, cada orden de mantenimiento considera recursos humanos, materiales, logísticos y económicos para poder

ser ejecutadas y un elemento obligatorio que se le asigna desde la elaboración del presupuesto de mantenimiento es la fecha en la que se realizará la actividad. Dichas actividades se basan en las frecuencias de mantenimientos por renovación del aislamiento, mantenimiento de aislamiento, pruebas de tres y seis años en los equipos del patio de llaves, fechas especiales o importantes, históricos de años anteriores para celdas de clientes (mineras, distribuidoras, cementeras, grandes clientes, otros) y en consecuencia los costos de desplazamiento y manutención del personal que se estiman en el primer cálculo del presupuesto basado en lo anterior no puede ser ajustado cuando hay cambios en las fechas o reducciones de tiempos de las salidas de las celdas a solicitud de los agentes y son en estos rubros donde se detecta la variación de la ejecución presupuestal del mantenimiento.

**Objetivo:** Busca alternativas para resolver el problema de las reprogramaciones, las cuales impactaron en el 2018 al Departamento de Transmisión Centro de la siguiente manera:

- Reducir la cantidad de viajes indebidos,
- Reducir la cantidad de avisos correctivos con prioridad vencida en el sistema SAP.
- Utilizar un máximo de 95% del presupuesto de mantenimiento anual.
- Controlar el riesgo operativo de los equipos por desviación del

mantenimiento en la fecha programada con el operador COES.

**Metodología:** El trabajo desarrollado propone reducir esta incertidumbre utilizando la teoría de Nash sobre los Juegos Cooperativos y No Cooperativos, la que se ideo al inicio para entender fenómenos económicos durante el siglo pasado ya que siempre fue una necesidad el lograr obtener la máxima ganancia posible en cualquier intercambio comercial o relación de negocio, el mantenimiento no es algo ajeno a ciertas variables que Nash concibió para su teoría.

Esta teoría menciona dos clases de juegos: cooperativo y no cooperativo. En el primero, los jugadores tienen comunicación entre ellos, pueden negociar y pueden formar coaliciones; en el segundo, los jugadores no tienen contacto, no negocian ni forman coaliciones. Para poder aplicar esta estrategia se identifican a los jugadores: REP y los agentes que cumplían con la condición de tener más de 03 reprogramaciones semestrales en el plan anual.

Una vez identificados los jugadores, se estructuraron reuniones individualizadas con cada agente en donde se compartió las frecuencias de mantenimiento, los impactos por las restricciones sociales, fechas de celebraciones regionales y fechas corporativas con estas restricciones se establecieron las reglas del juego. Con las reglas de juego identificadas para cada agente se desarrollaron las matrices binarias y se asignaron las ganancias para cada ejercicio en función del cumplimiento de los mantenimientos y se tomó

la mejor decisión del juego para que ambos jugadores logremos la máxima ganancia posible.

Dado el alcance geográfico y limitado número de agentes se define  $N$  como el conjunto de jugadores y  $S_j$  a las coaliciones ( $1, 2, 3, j$ ), para el presente trabajo consideraremos 1 a REP (Empresa Operadora y Mantenedor del sistema de Transmisión), 2 a DISTR 1 (Empresa Distribuidora de Energía, con celdas en SSEE de REP), 3 a ENOSA (Empresa Distribuidora de Energía, con celdas en SSEE de REP), 4 a VYT (contratista de REP para mantenimiento), etc. Para cada cuadro desarrollado de la metodología asignaremos coaliciones a fin de buscar la estrategia más óptima para el mantenimiento.

Las estrategias de juego que se tienen son las siguientes:

- a) REP mejora su ganancia cuando los mantenimientos son de lunes a viernes y aumenta su ganancia cuando empiezan martes.
- b) VYT aumenta su ganancia cuando mantiene al personal más tiempo para realizar más trabajos en la misma subestación.
- c) La empresa distribuidora aumenta su ganancia cuando los cortes para mantenimiento son los días sábados y domingos.
- d) El COES puede alterar las fechas de las salidas para mantenimiento cuando esto provoca un debilitamiento en el sistema o porque la salida de una unidad puede provocar una situación de inestabilidad.

Consideraciones del entorno para el juego:

- a) Existen instalaciones donde los cortes pueden ser cualquier día de la semana durante todo el año.
- b) Hay varias unidades de transformación que pueden salir en cualquier momento del año excepto en verano por la elevada carga que asumen los sistemas de confort.
- c) Durante el año existen fechas festivas donde la carga se incrementa llegando casi a la potencia nominal de las unidades de transformación limitando con ello la salida de bahías para el mantenimiento, siendo fechas en las que NO se puede realizar mantenimiento alguno, aún en servicio por el riesgo de disparo.
- d) Existen sistemas radiales cuya topología obliga a coordinar varias salidas durante cortos períodos de tiempo para realizar una gran cantidad de pruebas por lo que los recursos se concentran en esas fechas.

Le daremos valor a cada condición de la siguiente manera:

	REP	CONTRA.	COES	DIST
VAL.	CONDICIÓN			
0	R1: corte fines de semana y vcn no tiene más actividades	V1: corte día de semana y vcn tiene más actividades	C1: sistema no tiene condición de contingencia	D1: corte día de semana a un elevado número de usuarios

1	R2: corte fines de semana	V2: corte día de semana y vcn no tiene más actividades	C2: sistema mantiene condición n-1 a un costo elevado	D2: corte día de semana a un reducido número de usuarios
3	R3: corte día de semana y vcn no tiene más actividades	V3: corte fines de semana	C3: sistema mantiene condición n-1 a un costo moderado	D3: corte día de semana y se puede abastecer mediante maniobras en alimentadores
5	R4: corte día de semana y vcn tiene más actividades	V4: corte fines de semana y vcn no tiene más actividades	C4: sistema mantiene condición n-2	D4: corte fines de semana y afecta a pocos usuarios

		DIST			
		D1	D2	D3	D4
REP	R1	0	1	3	5
	R2	1	2	4	6
	R3	3	4	6	8
	R4	5	6	8	10

REP	DIST
→	0 5
→	1 6
→	3 8
→	5 10
MAXIMIN	MINIMAX
5	5

Para poder comprender la idea de la aplicación de la teoría de los juegos usaremos un escenario simple en el que se tiene un mantenimiento programado en una celda que afecta a un número grande de usuarios.

Basado en lo que se tiene del cuadro anterior tenemos las estrategias para REP: R1, R2, R3 y R4 con ponderados de 0, 1, 3 y 5 respectivamente y para el DIST (ejemplo Hidrandina) tenemos D1, D2, D3 y D4 con ponderados de 0, 1, 3 y 5 respectivamente. La regla de juego será que la ganancia para la tabla de 2x2 será la combinación de ambas en suma simple asumiendo que ambos son independientes entre sí, no tienen comunicación o intereses comunes y no hay agentes externos que afecten los resultados.

Así pues, tenemos el desarrollo:

El valor del MAXIMIN es el mayor valor de los mínimos que tiene cada opción para cada fila de REP, es decir cuál es su mejor de los peores escenarios y el MINIMAX es el menor valor de las máximas perdidas posibles que tiene el DIST. La mejor opción para REP es obviamente la R4 y para el distribuidor DIST es D4, se aprecia que los valores MAXMIN y MINIMAX son iguales. Esto se conoce como punto silla de equilibrio ya que se tiene un valor igual para ambos, es decir cada uno tiene una estrategia clara para ganar el juego.

Y en el sistema peruano no se encuentran tan fácilmente situaciones como estas, la figura más común es la de múltiples jugadores con interés propio que no permiten ver todas las posibilidades para obtener puntos de equilibrio sin importar los escenarios.

### Conclusiones

Permite optimizar los desplazamientos y coordinar recursos para mantenimientos que requieren un número excepcional de personas pues existen celdas o líneas que por la situación

operativa no disponen de más de un día por semestre (de 08 horas) para realizar todas las actividades programadas. Tal es así que incluso hay instalaciones cuyos cortes solo pueden ser hechos una vez al año y aún con previa coordinación de meses de anticipación la necesidad de las empresas por el máximo lucro no permite que el área de mantenimiento interna disponga de las instalaciones en los tiempos pre acordados en el COES, sino que es común recibir comunicaciones de cambio de fecha sin contar con el 100% de seguridad de que la nueva fecha propuesta por el área de producción sea la definitiva. Ha sucedido incluso que los cortes de estas celdas especiales han salido fuera del radar de la empresa y se ha perdido la oportunidad para aprovechar el corte.

Aplicando teoría de los juegos en REP: De la misma forma que se puede aplicar para el caso de un escenario de juego con participantes que no están relacionados entre sí a través de un vínculo que vaya más allá del coyuntural, es posible aplicar una estrategia de ganar-ganar dentro de la empresa en la que se tienen indicadores que apuntan a beneficios particulares que no estén 100% alineados de la misma manera para lograr cumplir los indicadores empresariales.

Se tiene que existen estrategias de juego donde se dan ganancias por cumplimientos de avisos a los departamentos de transmisión, se dan ganancias a los equipos de análisis en función de los hallazgos encontrados, se dan igualmente ganancias por cantidad de trabajo ejecutado

pero la calidad del trabajo tiene ópticas distintas o no es fácil de ver como todo se alinea al beneficio común. Así podemos plantear unas estrategias complementarias o “nuevas reglas de juego” de manera de que la posibilidad de ganar-ganar tenga mayor aceptación entre los participantes del juego.

Tenemos así:

1. Se mide la cantidad de equipos atendidos con avisos, pero también podemos ponderar el valor de cada aviso y su impacto en el sistema de atenderse o no atenderse.
2. Aprovechar las salidas fuera de servicio por causa de terceros y con ello adelantar trabajos debe tener un valor de oportunidad dado que eso reduce intervenciones innecesarias al sistema mejorando la imagen de la empresa ante clientes y sociedad. Esto debe de ser registrado y valorado de alguna manera.
3. La optimización de recursos al poder pasar avisos (cuya prioridad lo permita) al siguiente ejercicio presupuestal puede generar ahorro y oportunidad de aprovechar un proyecto, por ejemplo, cambio de herramientas que sea financiado en parte por el MEM al ser una necesidad del sistema y con ello aumentando los ingresos al año y contar con un sistema que requiere un costo de operación y manteniendo más bajo.

## Conclusiones:

- Reducir los viajes, es decir aprovechar al máximo la estadía en una subestación por parte del contratista para ahorrar el dinero que se gasta por desplazamientos, horas adicionales o extras por laborar en día feriado o en fin de semana.
- Reducir la cantidad de avisos N4 con prioridad vencida. Al poder contar con mayor tiempo para coordinar los cortes de corto y mediano plazo es posible agrupar mantenimientos por tipo de actividad y material.
- Aprovechar los cortes de proyectos para adelantar y atender los avisos N4 por oportunidad y dar incentivos para que el aprovechamiento de la oportunidad se mida favorablemente y no impacte negativamente como mantenimiento no programado o reactivo, indicador que da entender otro comportamiento que no sea la proactividad.
- Cuantificar los avisos por su impacto en el sistema permitiría saber si se está haciendo lo mínimo necesario, lo justo y necesario o más allá de lo esperado para prevenir que los equipos que se tienen con gran antigüedad logren aumentar su vida útil o poder contar con el mayor tiempo posible con estos equipos a fin de poder darle la mayor utilidad posible a la empresa y lograr mantener la condición de operatividad de los equipos, logrando con ello ser muy confiables en la operación de la red.

- Juntar los mantenimientos por empresa ejecutora en las celdas que no se requiere coordinación con terceros permite optimizar el uso del gasto de mantenimiento, así mismo se está planteando que estos trabajos se ejecuten en gran porcentaje en el primer semestre para poder contar con el segundo semestre para atender la mayor cantidad de avisos N4 que se generan en el primer semestre y permite conseguir en forma óptima el inventario de materiales, repuestos y también permite contratar con tiempo los servicios de tercero donde al poder contar con más tiempo podemos tener mejores propuestas económicas para la atención de los avisos N4.

**Lecciones Aprendidas:** Por lo expuesto en el presente documento se concluye que:

- La teoría de juegos se puede aplicar en la planeación del mantenimiento dado que existen similitudes entre los modelos sociales y los modelos estadísticos que trabajan de forma indirecta y directa en el mantenimiento.
- Es posible encontrar soluciones a través de la coordinación y empatía entre los jugadores si se demuestra que la ganancia mutua y la individual dan valor y cumplen con los objetivos del mantenimiento y operación de los sistemas eléctricos.
- El presente trabajo puede extender su alcance para los demás departamentos de transmisión de REP e incluso para las demás empresas del Grupo ISA.

## Bibliografía

- [1] Teoría de los Juegos, J. Nash
- [2] Ministerio de Energía y minas. (2011). Código Nacional de Electricidad – Suministro 2011. Aprobado y publicado mediante Resolución Ministerial N° 214 – 2011 – MEM/DM el 29 de abril del 2011.
- [3] ISO 55000, Assets Management, 2015

## Hoja de Vida de los Autores

Darwin Padilla Gutiérrez  
M.Sc. Gerencia de Mantenimiento – UNI.2017.  
Lima, Perú.  
Ingeniero Electricista – CIP 125553  
Lima, Perú  
Cargo actual: Especialista de Evaluación  
Departamento de Gestión del Mantenimiento  
Gerencia de Operación y Mantenimiento.  
Red de Energía del Perú.