

Propuesta de herramienta de toma de decisión para priorización de obras de Distribución en 23 kV del Sistema Centro de la ANDE**Francisco Barreto, Jazmín Sanabria, Félix Fernández****Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción****Paraguay****Resumen**

El sistema eléctrico paraguayo en los últimos años, experimentó un marcado aceleramiento en el crecimiento de la demanda atribuyéndola a las industrias, el comercio y por sobre todo al crecimiento de la población. En este sentido, la ANDE dispone de un programa de obras para la Generación, Transmisión y Distribución de energía eléctrica, descriptos en el Plan Maestro de Inversiones de la ANDE, exigidas por el Sistema Interconectado Nacional (SIN), que son necesarias para atender los requerimientos actuales de energía eléctrica y del crecimiento vegetativo del país. Particularmente, para el sistema de Distribución se contemplan nuevas obras que buscan atender la expansión del sistema y mejorar las condiciones del servicio eléctrico. En el plan de obras se incluye un programa para los alimentadores que comprende el grupo de obras de: ampliación, adecuación y refuerzos en las redes de Media Tensión (MT); para cada sistema: Metropolitano, Este, Central, Sur, Norte y Oeste. Las obras de nuevos alimentadores en 23 kV se focalizan en los puntos mencionados anteriormente, con el objetivo de mejorar la calidad del servicio y del producto de la energía eléctrica. Para lograr esto, se requiere de una gran inversión económica que son limitados para cada sistema, es por ello la necesidad de tener un plan de priorización de obras adecuado, de tal manera a que la ejecución de las obras sea lo más eficiente posible, desde varios puntos de vista, y en el tiempo establecido. En este sentido, el presente trabajo busca identificar cuáles son las obras de alimentadores en 23 kV prioritarios, en función a varios criterios de evaluación seleccionados, que determinan la conveniencia de cada obra para un determinado sistema, en este caso el Sistema Centro, para las obras del año 2021. Para ello, se propone una metodología de análisis multicriterio, basado en la herramienta de toma de decisión llamado Proceso Analítico Jerárquico (AHP), que permite evaluar las alternativas en función a los criterios y subcriterios seleccionados. El trabajo presenta un árbol jerárquico propuesto, en el marco del planteamiento del problema, junto con las alternativas seleccionadas para el año 2021. Además, una priorización de los alimentadores en 23 kV, según los criterios evaluados para el Sistema Centro. Con esto, se pretende brindar una metodología que permita jerarquizar las obras de alimentadores en 23 kV y colaborar con el proceso de toma de decisiones en el ámbito de la planificación de la compañía eléctrica paraguaya.

Palabras clave

Crecimiento de la demanda, Plan Maestro de Inversiones de la ANDE, Sistema de Distribución, Sistema Centro, Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Alternativas, Criterios de evaluación, Alimentadores.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de distribución en el país requiere de grandes inversiones que son previstas y planificadas en el Plan Maestro de Inversiones de la ANDE 2021-2030. Para el año 2021 es necesario un monto aproximado de 293.35 millones de USD [1], siendo ésta una cifra aproximada para cada año subsiguiente hasta el 2030. Con esta estimación de inversión y la incertidumbre existente en los sistemas de distribución, dificultan la decisión de ejecución de obras prioritarias. El Plan Maestro de Distribución (PMD) de la ANDE, se basa en la optimización de la red primaria y secundaria existentes, así como del desarrollo futuro con el fin de atender el crecimiento de la demanda de energía eléctrica en zonas ya incorporadas y la expansión hacia zonas aún no servidas [1],

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

mediante la inversión en infraestructura y sistemas que, garanticen el suministro de energía desde las subestaciones de distribución hasta los clientes finales, son estudios planificados y enfocados a la calidad y al costo necesario para alcanzarla. Por lo tanto, en la búsqueda por mejorar los niveles de eficiencia, exige examinar metodologías de apoyo para la priorización de las obras de distribución, donde intervienen múltiples criterios de decisión.

Los alimentadores de distribución, que comprenden una parte de la infraestructura de cada sistema del país, requieren de análisis precisos para obras requeridas y estimadas anualmente para cada sistema, como lo son: Metropolitano, Este, Central, Sur, Norte y Oeste. Los análisis de las redes de distribución en 23 kV son detallados en el PMD, considerando los escenarios de carga (máxima y mínima) además de la caída de tensión máxima admisible de los alimentadores [1]. En este contexto, el presente trabajo pretende realizar un análisis detallado de las obras de alimentadores en 23 kV, planteadas para el año 2021 en el Sistema Centro, considerando múltiples criterios, con el fin de obtener la mejor alternativa para el caso de estudio. Para ello, se utiliza el método llamado Proceso Analítico Jerárquico (AHP, del inglés *Analytic Hierarchy Process*), el cual se conoce como una metodología estructurada para el tratamiento de decisiones complejas, desarrollado por el matemático Thomas Saaty [2]. La toma de decisión se torna difícil para el planificador de los sistemas de distribución por los múltiples criterios que se deben considerar para obtener la mejor alternativa. Con el AHP se genera una priorización de las alternativas según la evaluación de criterios lo que da como resultado un análisis bastante práctico en un ambiente de incertidumbre y con una base científica sustentada [3]. Hace que los resultados obtenidos con el método AHP en la priorización de los alimentadores en 23 kV, sean consistentes y viables para la toma de decisión.

Debido a los diferentes aspectos involucrados para la matriz de decisión, se han considerado los siguientes criterios: criterio de lógicas sensibles, en la cual evalúa las cargas prioritarias para el sistema, el criterio económico, que evalúa la inversión requerida de cada obra; el criterio de factibilidad, tomando en cuenta la longitud de los alimentadores, y el criterio técnico, que evalúa a través de simulaciones con el software CYMDIST la expansión del sistema de distribución estudiado. Los criterios propuestos con múltiples enfoques sirven de apoyo a la toma de decisiones, con el fin de mejorar la calidad de la decisión y permite ser más explícito, racional y eficiente [4]. El trabajo analiza un caso de estudio considerando las siguientes alternativas: 3 nuevos alimentadores en Media Tensión para el Sistema Centro, previstos para el año 2021

2. ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

El AHP propuesto por Thomas Saaty (1977, 1980), es un método de toma de decisiones multicriterio, que se caracteriza por la descomposición y organización del problema en una estructura jerárquica. Esta técnica combina aspectos tangibles e intangibles para obtener en una escala de razón las prioridades relativas asociadas a las alternativas del problema [5].

2.1 Estructuración del proceso de valoración con el AHP

A partir de las variables y procedimientos de simulación, el AHP ayuda a determinar una escala estandarizada, realizando operaciones matemáticas posteriores. Las ponderaciones se dan en forma de comparaciones por pares [2]. A continuación, en la ecuación (1) se consideran una matriz de relación de pares con n criterios, cuyos pesos w_1, w_2, \dots, w_n , son respectivamente conocidos, cuyas filas dan las relaciones de los pesos de cada criterio con respecto a todos los demás. Entonces, se tiene la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & W_n/W_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = n * \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = n * W \quad (1)$$

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

Sea la matriz A de relación de pares normalizada de la ecuación anterior, y n un valor propio de A , W es el vector propio asociado a él. Se realiza la normalización del vector propio W dividiendo sus entradas por su suma. A es considerada consistente debido a que la siguiente ecuación (2):

$$a_{jk} = a_{ik} / a_{ij}, i, j, k = 1, \dots, n \quad (2)$$

Para la obtención del modelo estructural del AHP, es necesario seguir los siguientes pasos [6].

1. Definición del objetivo.
2. Identificación de los criterios de evaluación.
3. Evaluación de los subcriterios.
4. Determinación de las alternativas.

Con el marco del problema y el modelo estructural definidos, se realiza la obtención de los juicios de comparación por pares. La matriz de comparación por pares de los criterios es ponderada en relación al objetivo principal. En el AHP se utiliza una escala de valores de 1 al 9, como se menciona en [2], siendo: 1- Igualdad de importancia; 3- Moderada importancia de uno sobre otro; 5- Fuerte importancia; 7- Muy fuerte importancia; 9- Importancia extrema; todos definidos por los tomadores de decisión para la estimación de la matriz A , junto con el vector de prioridades resultante. El vector de prioridades se estima por el autovector principal de la matriz y se les da la prioridad relativa a los criterios medidos en dicha escala. Luego, se determina la matriz de comparación por pares de las alternativas con respecto a cuán mejor es uno sobre el otro en el cumplimiento de cada criterio, con valores medidos propios de las alternativas o medidos con la escala de razón sea cual fuere el caso a analizar. Finalmente, para las prioridades globales de las alternativas, se multiplica cada columna de las prioridades de cada alternativa con respecto a cada criterio y esto da como resultado el vector prioritario de las alternativas. Por último, se escoge la alternativa que presente la mayor prioridad.

3. MODELADO

3.1 Alternativas: 3 nuevos alimentadores en 23 kV para el Sistema Centro.

El trabajo analiza un caso de estudio que asume las alternativas de alimentadores en 23 kV propuestos para el Sistema de Distribución del Sistema Centro de la ANDE, planeados para el año 2021. A continuación, se evalúan las alternativas con su respectiva justificación de acuerdo al Plan Anual de Contrataciones de la ANDE para la evaluación de los criterios:

- 1) Alternativa 1: nuevo alimentador VAQ 05, para la subestación de Vaquería, se logra una disminución del desequilibrio de la corriente en las fases del alimentador VAQ 02.
- 2) Alternativa 2: nuevo alimentador COV 12, para la subestación de Coronel Oviedo, se desdobra la carga del alimentador COV 01 (80 A), el cual tiene más de 30 años de antigüedad. El nuevo alimentador permitirá garantizar el servicio a la planta de tratamiento de agua, el cual abastece a las ciudades de Coronel Oviedo y Villarrica.
- 3) Alternativa 3: nuevo alimentador ABA 05, para la subestación de Aba'i. El nuevo alimentador ABA 05 alimenta la ciudad de San Juan Nepomuceno y el ABA 02 alimenta la zona de Pindo'i, con esto se mejora el servicio en la ciudad de SJN y las localidades de Pindo'i, Ñu Pyahu, San y Francisco, del Distrito de SJN. Disminuyen las pérdidas en el sistema. Se transfiere la localidad de Pindo'i del alimentador CZA 03 al ABA 02.

Estas obras son esenciales para el sistema de distribución de la ANDE, Sistema Centro, y para la población de la zona. Por ello, se ha realizado un estudio técnico detallado utilizando el software CYMDIST. Las

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

simulaciones realizadas proveen datos que son utilizados como insumos para el análisis de decisión. El AHP tiene la capacidad de utilizar atributos cualitativos y cuantitativos en el proceso de toma de decisión [4].

3.2 Criterios e indicadores de evaluación

El propósito del modelo propuesto es el de proporcionar una serie de alternativas priorizadas, que son evaluadas considerando criterios técnicos, económicos y de factibilidad de implementación. En la figura 1 se puede observar la jerarquía de la decisión para las obras de nuevos alimentadores del Sistema Centro.

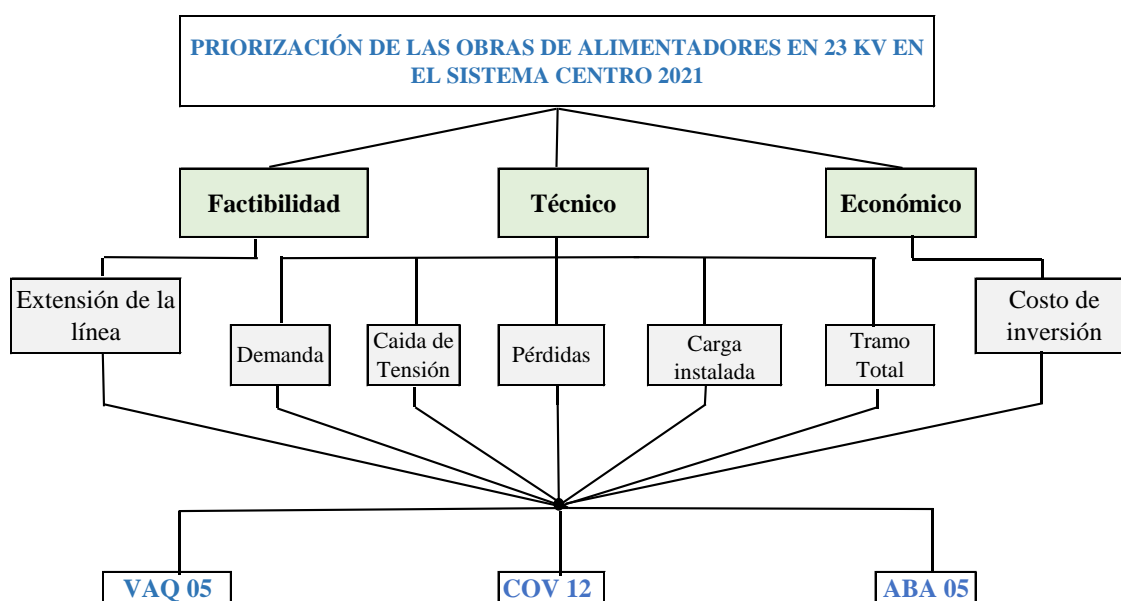


Figura 1: Árbol jerárquico

Los criterios y subcriterios propuestos fueron determinados en base a la experiencia de ingenieros de la ANDE, con el fin de proponer un análisis integral para cada alimentador estudiado.

3.2.1. Criterio Técnico

Desde la perspectiva de la confiabilidad y la calidad de la energía eléctrica, a fin de presentar una evaluación técnica de cada alternativa, fueron realizadas simulaciones con el software CYMDIST, para el análisis de los alimentadores considerando a los siguientes datos:

- Base de datos del Sistema Centro para el software CYMDIST, con una actualización del sistema correspondiente al año 2020, proveído por el Departamento de Planificación de la ANDE.
- Demanda máxima de los alimentadores del Sistema Centro del año 2020. Datos proveídos por la ANDE.
- Planificación requerida para el año 2021 de nuevos alimentadores descritos en el PAC (Plan Anual de Contrataciones 2021).

Luego de actualizar el modelo en el software, se determinaron los siguientes subcriterios:

3.2.1.1. Demanda

Para este subcriterio se han considerado como alternativas prioritarias a aquellos alimentadores que han absorbido más demanda de potencia, esto ha implicado un alivio de carga en los alimentadores existentes que

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

ya excedían el límite máximo requerido, 60% de la cargabilidad del alimentador [1], el análisis consiste en realizar la distribución de carga en el sistema y calcular la demanda en los tramos que serán transferidos al nuevo alimentador, obteniéndose la demanda base planificada.

3.2.1.2. Pérdidas técnicas

Este subcriterio busca una disminución de las pérdidas, a través de la flexibilidad operativa, por lo que las obras proyectadas introducen un mejoramiento del índice de pérdidas actuales. Los mismos son visualizados en las simulaciones realizadas con preferencia a las alternativas que implican menores pérdidas para el sistema

3.2.1.3. Caída de tensión

Con este subcriterio se ve reflejado la calidad de energía que se provee al consumidor, estableciendo un rango admisible del 4% [1]. Con las simulaciones realizadas se ha observado este parámetro para valorar con mayor preferencia al alimentador con un índice más cercano al requerido.

3.2.1.4. Carga instalada

Este subcriterio permitirá al planificador verificar cuán robusta y necesaria es el nuevo alimentador a construir, ya que se consideraron las transferencias de cargas estudiadas en las simulaciones, y así observar las cargas atendidas y consideración de cargas futuras. Con lo mencionado, se ha dado mayor preferencia a los alimentadores que han presentado mayores cargas instaladas.

3.2.1.5. Tramo total

Esto corresponde a la longitud trifásica y monofásica de los alimentadores implicados en los que se realiza la transferencia de carga. Con este subcriterio se podrá tener una mejor estructura radial para futuras obras de expansión, con el fin de mantener la demanda dentro del rango admisible. Luego de las simulaciones, se ha dado mayor preferencia a los alimentadores que inducen un mayor parámetro para el tramo total.

3.2.2. Criterio Económico

El indicador de este criterio mide el costo de inversión en guaraníes de las obras estipuladas en el Plan Anual de Contrataciones de la ANDE. Dichos costos sirven para una estimación inicial de los fondos necesarios para el financiamiento de las obras.

3.2.3. Criterio de Factibilidad

Este criterio mide el riesgo de ejecutar de manera adecuada las obras teniendo en cuenta los recursos financieros disponibles y los esfuerzos requeridos para su ejecución en función a la longitud de los alimentadores propuestos por kilómetros. Esto también representa el impacto medioambiental que tiene cada alimentador analizado [7].

4. RESULTADOS

4.1 Criterio Técnico: simulaciones con el software CYMDIST

Tabla I: Resultados de simulaciones con el software CYMDIST para los alimentadores propuestos

CRITERIO	Técnico				
	Demanda (A)	Carga instalada (KVA)	Pérdidas (KVA)	Tamo Total (Km)	Caída de Tensión %
VAQ 05	70	4.597	217,69	245,43	3,65
COV 12	100	7.375	128,98	91	3,36

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

ABA 05	188	4.358	291,56	66,34	3,66
--------	-----	-------	--------	-------	------

Cada alternativa de alimentadores tiene una infraestructura y planificación diferente, con este análisis se busca abarcar la necesidad de cada alimentador al sistema que fueron mencionados anteriormente como justificación y considerados como criterios técnicos.

4.2 Aplicación del método AHP

Para el análisis multicriterio, primeramente, se analiza desde las alternativas hasta llegar al objetivo principal, de acuerdo a la estructura del árbol jerárquico; se determina el peso relativo que tendrá cada una de las alternativas en función a cada subcriterio. Luego el peso que tendrá cada subcriterio en relación a cada criterio para luego calcular cuál es el peso de cada alternativa en función a cada criterio de evaluación. Seguidamente se determinan los pesos de cada criterio, para luego obtener la priorización global de cada alternativa en función al objetivo principal del trabajo.

4.2.1.1. Priorización de alternativas respecto a criterios y sub criterios

Se determina la Matriz A de las alternativas para cada sub criterio y criterio, luego ésta se normaliza obteniéndose la matriz A' , y para todos los casos se determina el autovector de pesos relativos W , como se muestra en el Apéndice V y VI.

4.2.1.2. Priorización de subcriterio con respecto a los criterios

Se determina la Matriz A para cada sub criterio respecto al correspondiente criterio, luego se normaliza la matriz y se obtiene la Matriz A' , y para todos los casos se determina la Matriz W , el autovector correspondiente. El procedimiento mencionado fue utilizado para determinar los valores mostrados en las Tabla II para el criterio Técnico.

Tabla II: Priorización de los sub criterios para el Criterio Técnico

Criterio Técnico	Demanda	Pérdidas Técnicas	Caída de tensión	Carga instalada	Tramo total	W
Demanda	1	1	1	1	1	0,2
Carga instalada	1	1	1	1	1	0,2
Pérdidas Técnicas	1	1	1	1	1	0,2
Tramo total	1	1	1	1	1	0,2
Caída de tensión	1	1	1	1	1	0,2

4.2.1.3. Priorización de criterios en relación al objetivo

De la misma manera se determina la Matriz A de los criterios con respecto al objetivo, luego se normaliza y se obtiene la Matriz A' , para finalmente determinar el autovector de ponderaciones W , como se muestra en la Tabla III. Para este trabajo se consideraron pesos iguales para cada criterio. Matriz de comparaciones pareadas de los Criterios respecto al objetivo y su autovector W .

Tabla III: Matriz de comparaciones pareadas de los criterios respecto al objetivo y su autovector W

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Criterios	Económico	Técnico	Factibilidad	W
Económico	1	1	1	0,333
Técnico	1	1	1	0,333
Factibilidad	1	1	1	0,333

4.2.1.4. Priorización de alternativas respecto al objetivo

A partir de los vectores resultantes para cada criterio, se forma una matriz conformada por estos como se muestra en la Tabla VI en el Apéndice, los cuales se multiplican por el vector de los pesos de cada criterio *W* mostrado en la Tabla III. Luego, se obtiene el autovector que representa la solución, que se asienta en la Tabla VII del Apéndice. El resultado da una priorización para los nuevos alimentadores en 23 kV.

5. CONCLUSIONES

Con el AHP aplicado a la priorización de obras de distribución, se pretende brindar al planificador un proceso innovador en la toma de decisiones. Se expuso un análisis técnico utilizando el software CYMDIST para cada obra, considerando que los alimentadores pueden tener un rendimiento diferente de acuerdo a diferentes criterios.

Se ha desarrollado un modelo integral de decisión, para así promover una gestión adecuada en la selección de los alimentadores desde el punto de vista técnico, las inversiones necesarias de cada obra y su factibilidad de implementación. Las alternativas analizadas corresponden a una planificación de 3 nuevos alimentadores para el Sistema Centro: VAQ 05 para la subestación Vaquería, ABA 05 para la subestación en Aba'i y el alimentador COV 12 para la subestación Coronel Oviedo. Estos fueron analizados bajo los siguientes subcriterios: demanda, caída de tensión, pérdidas, carga instalada, tramo total del alimentador, costo de las obras y la factibilidad de las líneas con relación a los kilómetros de construcción, obteniendo así la estructura jerárquica para la aplicación del AHP. El modelo propuesto expone un análisis integral con el fin de que los resultados sean lo más representativo posible. El resultado de la mejor alternativa de los 3 alimentadores analizados corresponde al alimentador COV 12, con un peso del 38%.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Plan Maestro de Distribución 2021-2030. Administración Nacional de Electricidad, Paraguay, 2021 páginas 12-13-i

[2] T. Saaty, "How to make a decision: the analytic hierarchy process INTERFACES 24:6", *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 1994, pág. 19-43.

[3] J. Jiménez, "El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones", *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 2002, pág. 28-77.

[4] S. Pohekar, M. Ramachandran, "Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, pág. 365-381.

[5] J. Jiménez, M^a T. Escobar, "El pesar en el proceso analítico jerárquico I Estudios de Economía Aplicada", *Asociación Internacional de Economía Aplicada*, 2000, pág. 95-115.

[6] S. Berumen, F. Llamazares Redondo. "La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente.", *Cuadernos de administración*, 2007, pág. 65-87.

[7] V. CONESA, F. VITORIA, "Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental", *MUNDI-PRENSA*, 2006, pág.13.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

APÉNDICE

Tabla IV: Datos correspondientes a los subcriterios

ALTERNATIVAS	SUB CRITERIOS						
	Costo de inversión (Gs)	Extensión (Km)	Demanda (A)	Pérdidas (kVA)	Caída de Tensión (%)	Carga Instalada (KVA)	Tramo Total (Km)
VAQ 05	3.489.517.516	20,8	70	217,69	3,65	4.597	245,43
COV 12	3.064.623.749	20,3	100	128,98	3,36	7.375	91
ABA 05	8.193.142.756	32,6	188	291,56	3,66	4.358	66,34

Tabla V: Resultados de priorización con relación a los subcriterios

ALTERNATIVAS	SUB CRITERIOS						
	Costo de inversión (Gs)	Extensión (Km)	Demanda (A)	Carga Instalada (KVA)	Pérdidas (kVA)	Tramo Total (Km)	Caída de Tensión (%)
VAQ 05	0,39	0,37	0,195	0,28	0,34	0,61	0,32
COV 12	0,44	0,39	0,28	0,45	0,20	0,22	0,35
ABA 05	0,16	0,24	0,52	0,26	0,45	0,16	0,33

Tabla VI: Resultados de priorización con relación a los criterios

Alternativas	Económico	Factibilidad	Técnico
VAQ 05	0,39	0,375	0,35
COV 12	0,44	0,38	0,30
ABA 05	0,166	0,239	0,34

Tabla VII: Resultados de la aplicación del AHP para priorización de obras de líneas de distribución en 23 kV del Sistema Centro de la ANDE

Alternativas	Resultados
VAQ 05	0,37
COV 12	0,38
ABA 05	0,25