

Tomado del libro

DECISIONES con múltiples objetivos e incertidumbre

**de Ricardo A. Smith Q., Germán Poveda J., Oscar J. Mesa S.,
Darío Valencia R. e Isaac Dyner R.**

**Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia**

Medellín, Colombia, 1993

15.4 PLANEAMIENTO DE INVERSIONES EN ELECTRIFICACION RURAL

Un ejemplo de gran interés práctico, que pone de presente la utilidad de la teoría de los múltiples atributos para la toma de decisiones sobre inversión, tiene que ver con la electrificación rural en una región del departamento de Antioquia. La aplicación señala que no es posible adoptar decisiones racionales en ese campo sin ayuda de análisis cuantitativos, con inclusión de procedimientos formales de optimización, y sin considerar diferentes objetivos inherentes a la electrificación. Aquí se sintetizarán los trabajos de Manjarrés (1989) y Manjarrés y otros (1990).

Dado un presupuesto de inversiones, un objetivo sería maximizar el número de nuevas viviendas electrificadas; éste será el objetivo de eficiencia. Pero se observa que lo anterior puede dejar de lado el criterio de atender municipios con baja electrificación, en donde ésta tal vez sea más costosa en razón de la ausencia de subestaciones y redes, o de la baja densidad de carga; dicho criterio corresponde al objetivo de equidad. También debe considerarse en este caso la necesidad de dar prioridad en el proceso de electrificación a algunos municipios, por razones que se explicarán más adelante; el nuevo objetivo se denomina de prioridad. Finalmente, razones políticas llevan a veces a considerar conveniente hacer presencia en cada uno de los municipios de la región, dando origen al objetivo de presencia política.

Será fácil observar que en situaciones tan complejas una decisión que obedezca simplemente a presiones políticas o sea el fruto de análisis someros o intuitivos, va ser con seguridad de carácter subóptimo (asignación ineficiente o socialmente inadecuada de recursos) y no podrá estimar los efectos de esa decisión sobre los objetivos antes mencionados.

El ejemplo permite ilustrar el uso de la optimización con restricciones en algunos casos de múltiples objetivos. Uno de los objetivos, el de eficiencia, irá en la función de objetivos que será sujeto de la maximización, y los otros objetivos aparecerán como restricciones que por lo general reducirán el valor del primer objetivo.

El problema

La Corporación Autónoma Regional Río Negro-Nare "CORNARE" tiene jurisdicción sobre 26 municipios del oriente antioqueño y entre sus responsabilidades está la de adelantar la electrificación rural. En efecto, Interconexión Eléctrica S.A. y Empresas Públicas de Medellín destinan el 4% de las ventas brutas de energía en bloque, correspondientes a plantas hidroeléctricas suyas situadas en dicha jurisdicción, a dicha Corporación con el fin primordial de reforestar y proteger los recursos naturales, en especial en las zonas afectadas por obras

hidroeléctricas, y de hacer electrificación rural, con prioridad en los municipios relacionados con dichas obras. Todo ello según lo establece la Ley 56 de 1981, que regula las relaciones entre comunidades y entidades dueñas de proyectos.

Los recursos para electrificación rural, si bien son significativos, no alcanzan para atender todos los requerimientos. Por ello es necesario llegar a una asignación óptima que tenga en cuenta criterios económicos y sociales, al igual que se respeten los mandatos legales.

Con el fin de conocer la dotación del servicio de energía y las necesidades de inversión, CORNARE contrató varios estudios con firmas de ingeniería, los cuales permitieron identificar un total de 956 proyectos, cada uno de los cuales describió mediante, entre otros aspectos, localización (vereda y municipio), número de viviendas favorecidas y costo del mismo.

No ofrece dificultad conocer los recursos disponibles ahora y en el futuro para electrificación, pues es posible estimar las transferencias que recibirá CORNARE provenientes de Interconexión Eléctrica S.A. y Empresas Públicas de Medellín, con base en proyecciones de las ventas de estas últimas y a la luz de la ya señalada Ley 56 de 1981.

Los objetivos

De los 956 proyectos identificados, 124 habían sido construídos por la Corporación hasta la fecha de realización del trabajo que aquí se reseña. Como no existía un procedimiento formal de análisis, las inversiones se dirigieron a atender básicamente los cuatro municipios prioritarios de la región; unos pocos proyectos se realizaron en los restantes municipios, principalmente por razones políticas.

La estrategia anterior no consulta las necesidades globales de la región pues los dos criterios mencionados dejan de lado el criterio de eficiencia regional y el criterio de subsanar las diferencias en el avance de la electrificación. Aquella estrategia no permite alcanzar un uso eficiente de los recursos escasos disponibles ni consultar necesidades apremiantes de algunas localidades.

Con el fin de considerar los diversos elementos en juego, cuantificar los efectos que sobre aquellos tienen las decisiones, y hacer más transparente el proceso de decisiones, se introdujeron los cuatro objetivos antes mencionados, los cuales se indican a continuación con indicación de su respectiva escala de medida.

Objetivo de eficiencia. Intenta que las inversiones favorezcan al mayor número de personas, o sea, que tengan el más alto rendimiento. En esta aplicación, se buscará maximizar la relación beneficio-costos asociada con cada grupo de proyectos, o sea, conseguir el máximo incremento de nuevas viviendas electrificadas en la región.

Objetivo de equidad. Las coberturas municipales en cuanto a electrificación variaban entre 8,1% y 93,2%, de manera que salta la necesidad de ir corrigiendo en forma paulatina unas diferencias aberrantes. La escala de medición vendrá dada por porcentajes de electrificación, y el desiderátum será ir aumentando en forma progresiva el porcentaje mínimo de la región. Se colige que un aumento de este objetivo sacrifica la eficiencia, pues es bien posible que los proyectos en municipios pobremente electrificados pueden ser costosos.

Objetivo de prioridad. Como ya se dijo, la Ley 56 de 1981 establece ciertas prioridades, entre ellas la de electrificación, para los municipios en cuyo ámbito se encuentren los embalses de los proyectos hidroeléctricos. El objetivo de prioridad está medido en porcentajes de electrificación y puede ser introducido en la formulación mediante el señalamiento de metas mínimas de electrificación que se deben cumplir con respecto a los municipios prioritarios.

Objetivo de presencia política. Se persigue aumentar el deseo del decisor de mantener una presencia activa en toda la región, construyendo al menos un proyecto por municipio y por año de inversiones.

Es fácil observar, en forma cualitativa, que los cuatro objetivos tienen ciertos grados de exclusión. Por lo general, al aumentar un objetivo se sacrifican los restantes. Si se desea, por ejemplo, incrementar la eficiencia, es posible que se afecten los incrementos de cobertura mínima (equidad), no se pueda cumplir la meta para alguno de los municipios prioritarios, o no sea viable tener presencia política en todos los municipios. El procedimiento que se mostrará más adelante pondrá de presente en forma cuantitativa, mediante las curvas de transformación, las relaciones entre aumentos y sacrificios, de manera que el decisor encuentre su camino de acción a la luz de su apreciación de los objetivos, y conozca en valores concretos los sacrificios en que hace incurrir a algunos objetivos en razón de sus predilecciones por otros.

Formulación matemática

El problema ya descrito va a ser formulado como un problema de programación matemática del tipo entero cero-uno. La solución de este problema de optimización con restricciones conducirá a las curvas de transformación, claves para la toma de decisiones con múltiples objetivos.

Función de objetivos. Se trata de maximizar el número de nuevas viviendas electrificadas, así:

$$\text{Max } Z = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^{956} I_{k,t} \text{ NUVIV}_k$$

siendo

$I_{k,t}$: variable binaria que indica si el proyecto k se construye (1) o no (0) al comienzo del período t .

NUVIV_k : número de viviendas que se benefician con el proyecto k

T : fin del horizonte de planeamiento

Puede observarse que se trata del objetivo de eficiencia expresado como z , la función que debe maximizarse.

Restricciones estructurales. Se relacionan con la configuración física del sistema y son las de no duplicidad y contingencia.

$$\sum_{t=0}^T I_{k,t} \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, 956$$

Esta restricción asegura que un proyecto dado se construirá a lo sumo una vez durante el período de planeamiento.

$$I_{k,t} \leq \sum_{j=0}^{t-1} I_{j,t}$$

Con la anterior restricción se asegura que un proyecto k no puede construirse si otro proyecto j no ha sido construido con anterioridad.

Restricciones presupuestales. Para cada año, es necesario contemplar que las inversiones en nuevos proyectos no pueden exceder el correspondiente presupuesto. De manera que

$$\sum_{k=1}^{956} I_{k,t} \text{ COSTO}_{k,t} \leq \text{PRESUP}_t, \quad t = 0, 1, \dots$$

en donde

$\text{COSTO}_{k,t}$: costo de construir el proyecto k al comienzo del año t .

En esta aplicación, tanto los costos de los proyectos como las proyecciones presupuestales fueron llevados a pesos de enero de 1990.

Como se ha visto, cuatro objetivos fueron considerados de importancia al contemplar la electrificación rural en una región. Uno de dichos objetivos, el de eficiencia, ha sido ya incluido en la función de objetivos. Ahora, se incluirán los otros tres en sendas restricciones.

Restricción de equidad. Este objetivo busca corregir los desequilibrios en la cobertura, medida ésta como el porcentaje de viviendas electrificadas, por ejemplo estableciendo una cobertura mínima deseable para cada municipio al final de cada período considerado. Así

$$COBERO_{i,t-1} + \sum_{k \in i} I_{k,t} CONTRI_k \geq COBDES_{i,t}$$

siendo

$COBERO_{i,t-1}$: cobertura del servicio en el municipio i al comienzo del año t .

$CONTRI_k$: contribución del proyecto k al incremento de la cobertura en el municipio i ; la sumatoria se toma sobre todos los proyectos que pertenecen a dicho municipio.

$COBDES_{i,t}$: cobertura deseada para el municipio i al final del año t .

Restricción de municipios prioritarios. Para atender este objetivo, puede establecerse que para los municipios prioritarios se satisfaga cada año una parte proporcional de la cobertura faltante, de manera que al final del período de planeamiento se tenga una cobertura del 100% para cada uno de esos municipios. Se tendría entonces

$$\sum_{k \in i} I_{k,t} CONTRI_k \geq DCOB_i$$

$$i : \text{municipio prioritario}, \quad t = 0, 1, \dots$$

en donde

$DCOB_i$: incremento gradual de la cobertura para el municipio i , de manera que se obtenga un 100% para dicho

Restricción de presencia política. Si se desea que al menos un proyecto por año se construya en cada uno de los municipios, aparecería la siguiente restricción:

$$\sum_{k \in i} I_{k,t} \geq 1 \text{ para todo } i \text{ y para todo } t$$

Resultados.

Para resolver la formulación anterior, se definió un horizonte de planeamiento igual a cinco años, correspondientes al período 1990-1994. Se consideró que horizontes más largos pueden estar afectados de significativas incertidumbres en lo tocante a proyecciones presupuestales, costos de los proyectos, etc.

Cada solución al problema de optimización proporciona los proyectos que deben construirse cada año durante los cinco años, de tal manera que se maximice el número total de viviendas electrificadas sujeto a que se verifiquen todas las restricciones, en particular aquellas relacionadas con los objetivos. Si alguna o algunas de éstas sufren cambios (por ejemplo, se aumentan las coberturas mínimas o se acelera la electrificación de municipios prioritarios) entonces los conjuntos de proyectos también, en general, cambian.

Si de cada solución se toma el primer año, es posible analizar en forma sencilla la interacción de los diferentes objetivos. De acuerdo con la teoría de los múltiples objetivos, el conjunto de soluciones no dominadas constituye la curva de transformación cuando se trata de dos objetivos, la superficie de transformación si son tres objetivos, y la hipersuperficie de transformación cuando se trata de cuatro o más objetivos. Para facilitar la visualización, en lo que sigue se estudiarán dos objetivos a la vez.

La figura 15.4.1 muestra la curva de transformación eficiencia-ecuidad, resultado de maximizar el número de viviendas electrificadas sujeto a una cobertura mínima en todos los municipios. Se han eliminado condiciones sobre el cumplimiento de los objetivos de prioridad y presencia política.

Se observa que los puntos A, B, C, D y E corresponden a la cobertura mínima actual y a las coberturas mínimas de 10%, 20%, 30% y 40%, respectivamente. Ellas son el resultado de maximizar las viviendas electrificadas sujeto, en cada caso, a una de las restricciones anteriores de cobertura mínima.

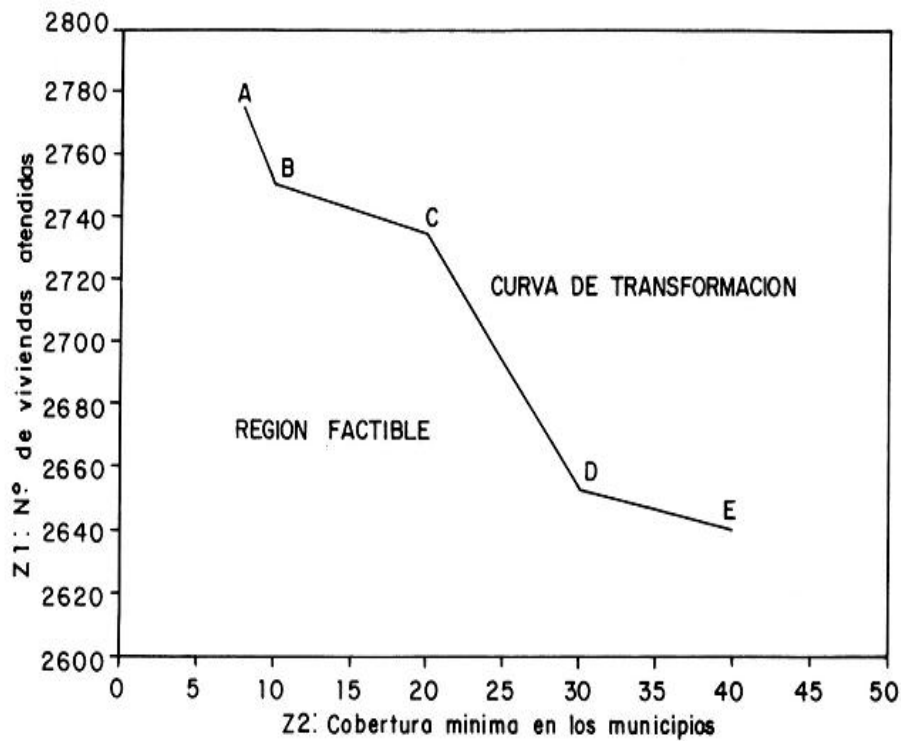


Figura 15.4.1 Curva de transformación Eficiencia-Equidad

Puede notarse que al aumentar el nivel de cobertura mínima, disminuye el número de viviendas atendidas en la región. Es entonces fácil ver en el gráfico qué sacrificio hay que hacer de la eficiencia para buscar mayor equidad. Por ejemplo, si se desea elevar la cobertura mínima en la región al 40%, es necesario sacrificar 129 viviendas, un número relativamente bajo. También se anota que con los fondos previstos para ese año, no es posible alcanzar una cobertura mínima del 50%.

La figura 15.4.2 despliega los resultados de maximizar eficiencia sujeto al cumplimiento de una cobertura mínima en los municipios prioritarios, ignorando los restantes dos objetivos.

Se han escogido puntos de solución que corresponden a la cobertura mínima actual y otras mayores que varían de 5% en 5%. Puede verse que para alcanzar la cobertura mínima del 95% en los municipios prioritarios, es

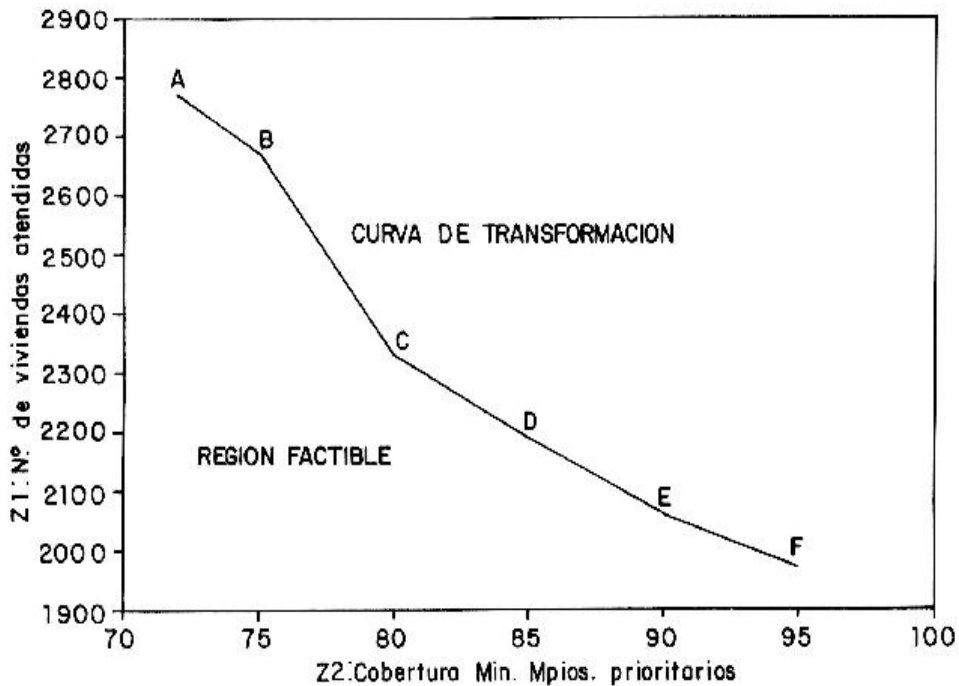


Figura 15.4.2 Curva de transformación Eficiencia-Prioridad

necesario disminuir el objetivo de eficiencia en 783 viviendas. Aquí puede ilustrarse la tasa de intercambio: al ir de A a F, se intercambian 783 viviendas por aproximadamente 22% de aumento en la cobertura. Llama la atención esta importante disminución de la eficiencia, en especial si se compara con el sacrificio señalado a propósito de la figura 15.4.1.

Algunos comentarios finales sobre las figuras 15.4.1 y 15.4.2. Ambas curvas de transformación ponen de presente el carácter parctiano de las soluciones: se trata de puntos óptimos (no dominados) tales que al ir de uno a otro se desmejora uno de los objetivos. En atención al volumen de cálculos requeridos, solo se presentan en los gráficos algunas soluciones (definidas por las discretizaciones de cobertura en uno y otro caso). Pero así la discretización fuese muy fina, las curvas de transformación no serían líneas continuas sino conjuntos finitos de puntos, al igual que las regiones factibles de cada figura no son áreas sino conjuntos finitos de puntos (ello se debe a que cada punto óptimo o factible es el resultado de una combinación de proyectos tomada del total finito

de los mismos).

Las dos curvas de transformación vistas proporcionan elementos para ilustrar el juicio del decisor. Si la inclinación de éste por un objetivo es total, es claro que la decisión buscará puntos extremos de dichas curvas (F de la figura 15.4.2 para el caso de cobertura mínima en municipios prioritarios, por ejemplo). Si se busca vías intermedias, como parece más natural, las tasas de intercambio son una guía de gran utilidad. Es muy significativo señalar que el ámbito de la decisión está restringido a soluciones no dominadas, o sea, que son el resultado de una optimización. Decisiones arbitrarias o que buscan atender intereses políticos o intereses locales, corresponderán con seguridad a soluciones ineficientes o subóptimas y estarán haciendo un uso inadecuado de los escasos recursos existentes.

Si ahora se contemplase tres objetivos (por ejemplo maximizar eficiencia sujeto a condiciones sobre equidad y prioridad) se obtendría una superficie de transformación (o mejor, un conjunto de puntos que definen aproximadamente una superficie). Para visualizar los resultados podría recurrirse a una representación tridimensional, o a secciones o proyecciones. La consideración de los cuatro objetivos complica el análisis, pero una variación incremental de uno de los objetivos que aparecen en las restricciones, produce cada vez una situación tridimensional.