

ARK: <https://n2t.net/ark:/87558/tekhne.27.1.5>

Modelo del costo de la transición de la energía eléctrica en Venezuela

Edwin Perez¹, Sergio Velásquez²

eperezbr@ucab.edu.ve¹, svelasquez@unexpo.edu.ve²

<https://orcid.org/0000-0003-0952-863X>¹, <https://orcid.org/0000-0002-3516-4430>²

Universidad Católica Andrés Bello¹, Puerto Ordaz, Venezuela

Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre², Puerto Ordaz, Venezuela

Resumen

Se expone un nuevo modelo aplicativo del costo de la transición de la energía eléctrica en Venezuela, acorde a las actuales condiciones económicas y sociales, que puede conllevar a una transición energética, lo que implica innovar con un concepto, alícuota de la energía, el cual integra el costo de la energía y la huella de Carbono [HC], incluyendo el costo social [SCC], permitiendo la regulación a las empresas prestadoras de servicios y que puedan ser más eficientes; ya que, tradicionalmente, estos aspectos se han visto por separado en dos dimensiones, pero se puede plantear la interrelación en un sistema no lineal de tres dimensiones (costos, energía y CO₂). Basado en un modelo matemático que permitan su convalidación, en diferentes escenarios, partiendo de la premisa que en la actualidad se aplica un modelo lineal y obsoleto de más de veinte años, de tal manera que necesita ser cambiado, por lo que deben incluirse todas las variables predominantes, que permitan obtener como resultados un modelo óptimo tanto para el proveedor del servicio como para los usuarios, que pueda abarcar a los diferentes tipos de servicios, basado en simulaciones del Sistema Eléctrico Nacional [SEN], en condiciones operativas lo más realistas posibles, ya que para poder recuperarlo se requieren cuantiosas inversiones; por consiguiente, será necesario atraer capitales externos y se le debe garantizar la rentabilidad de cualquier proyecto.

Palabras clave: Costo de la energía, Optimización no lineal, Transición energética.

Model of the cost of the transition of energy electric in Venezuela

Abstract

A new application model of the cost of the transition of electrical energy in Venezuela is exposed, according to the current economic and social conditions, which can lead to an energy transition, which implies innovating with a concept, energy aliquot, which integrates the cost of energy and the carbon footprint [HC], including the social cost [SCC], allowing the regulation of companies that provide services and that they can be more efficient; since, traditionally, these aspects have been seen separately in two dimensions, but the interrelation can be considered in a non-linear system of three dimensions (costs, energy and CO₂). Based on a mathematical model that allows its validation, in different scenarios, based on the premise that a linear and obsolete model of more than twenty years is currently applied, in such a way that it needs to be changed, so all the variables must be included. predominant variables, which allow an optimal model to be got as results for both the service provider and the users, which can cover the different services, based on simulations of the National Electric System [SEN], in the most realistic operating conditions possible, since recover it, large investments are required, it will be necessary to attract external capital, and the profitability of any project must be guaranteed

Keywords: Energy cost, Nonlinear optimization, Energy transition

Modelo de custo da transição de energia elétrica na Venezuela

Resumo

É exposto um novo modelo de aplicação do custo da transição da energia elétrica na Venezuela, de acordo com as atuais condições econômicas e sociais, que pode levar a uma transição energética, o que implica inovar com um conceito, alíquota energética, que integra o custo de a energia e a pegada de carbono [HC], incluindo o custo social [SCC], permitindo a regulação das empresas prestadoras de serviços e que estas possam ser mais eficientes; já que, tradicionalmente, estes aspectos têm sido vistos separadamente em duas dimensões, mas a inter-relação pode ser considerada num sistema não linear de três dimensões (custos, energia e CO₂). Baseado num modelo matemático que permite a sua validação, em diferentes cenários, partindo da premissa de que atualmente se aplica um modelo linear e obsoleto com mais de vinte anos, de tal forma que necessita de ser alterado, pelo que todas as variáveis devem ser incluído. variáveis predominantes, que permitem obter como resultados um modelo óptimo tanto para o prestador de serviço como para os utilizadores, que possa abranger os diferentes serviços, com base em simulações do Sistema Eléctrico Nacional [SEN], nas condições de funcionamento mais realistas possíveis, uma vez que recuperá-lo são necessários grandes investimentos, será necessário atrair capital externo e a rentabilidade de qualquer projeto deve ser garantida.

Palavras-chave: Custo da energia, Otimização não linear, Transição energética.

Introducción

La presente disertación versa principalmente sobre cuál sería el costo de una transición energética en Venezuela, que permitirá a los Stakeholders, interesados en apostar por las grandes inversiones que se requieren, para la recuperación del Sistema eléctrico nacional [SEN] a condiciones operativas de hace 20 años atrás. De acuerdo con [1] las circunstancias actuales de suministró es en base al sistema hidroeléctrico del bajo Caroní, con una estimación inicial del 70% de toda la alimentación del país, por lo que en un futuro próximo debemos considerar otros aspectos como la generación termoeléctrica a base de gas, que posee un costo diferente al hidroeléctrico

Para esto sería necesario concebir, ¿Qué modelos de regulación y control se pueden plantear en los entornos energéticos en correlación a los subsidios? Ya que estos pueden convertirse en factores limitantes para cualquier propuesta, para aplicar un sistema de alícuotas de la energía considerando la huella de carbono [HC], para esto se propone un modelo de costo de la energía que se interrelacione en tres dimensiones (costos, energía y CO₂), partiendo

de un modelo de tiempo discreto con entradas de control, su posible resolución de optimización no lineal, donde el objetivo fundamental es la formulación de un nuevo sistema de alícuotas de la energía, que permita incentivar al consumidor la disminución de la [HC], por lo que es necesario la búsqueda de un conjunto de soluciones factibles y de restricciones, las cuales, en el caso Venezolano, son únicas, ya que puede permitir un nuevo modelo de transición energética.

El suministro de energía actualmente presenta una tendencia global liberalizadora de la economía, se produce a nivel mundial un cambio de paradigma en la organización industrial del sector eléctrico [2]. Esta concepción da lugar a un nuevo entendimiento, donde se debe identificar cómo contribuir con la sostenibilidad ambiental y sabiendo que esos recursos se agotan cada día, se podría decir que los modelos en la actualidad son insostenibles a mediano y largo plazo, por lo que son necesarios nuevos marcos regulatorios como el que se pretenden discernir en esta investigación.

Antecedentes

Transición Energética

Cuando se aborda esta temática, es de suma importancia considerar lo que puede tener lugar,

socialmente, su dinámica en entornos energéticos específicos; no podemos pretender que en todas las partes sea igual, ya que, en los propios países desarrollados es difícil su aplicación, por lo que intentar compararse y aplicarla en los países subdesarrollados, puede ser un gran reto. De acuerdo con lo establecido por [3] no existe una definición comúnmente aceptada en la literatura académica, lo que encontramos es un tema común dentro de ellos; lo que implica un cambio en el sistema de energía, generalmente la fuente, tecnología y uso en particular, pero para complicar las cosas, en algunas circunstancias lo que puede parecer un cambio disruptivo en realidad puede ser un conjunto más discreto, la suma de muchos pequeños cambios, lo que implica que medirla puede ser más complicado de lo que parece. Independientemente de su concepto, los registros históricos respaldan de que toman tiempo, que puede ser único para cada caso específico. Se debe tener muy presente de que existen diferentes interpretaciones del entorno social, puede referirse al mundo como un todo, un grupo, un país, pequeño o grande, solamente una parte, ciudad o pueblo o un segmento particular de la población, los campesinos de bajos ingresos. Debemos empezar por las investigaciones sobre los efectos globales de la acción humana en la naturaleza. Las propiedades de los gases de efecto invernadero [GEI] fueron analizadas por [4]. Este planteó un modelo para definir que el incremento de la temperatura observada afecta al balance térmico de la Tierra, era 30 °C superior a la que tendría si se consideran exclusivamente factores geométricos y que la causa de esta diferencia radica en el papel de la atmósfera, es decir, que, desde hace 126 años, la ciencia se está pronunciando sobre este problema y todavía no llegamos a un consenso para abordar la problemática. Según [5] afirma que la ciencia del cambio climático, desde entonces, proporcionó la primera predicción numérica del impacto de la duplicación del [GEI] en la atmósfera. Su estimación de que representaría un incremento de 5,1 °C es notablemente cercana a las cifras proporcionadas por los modelos matemáticos validados en la actualidad. Por lo tanto, cuando los académicos conceptualizan la dinámica temporal de una transición energética, histórica o incluso futura, suponen que los desplazamientos y cambios llevarán muchos años, ya que es necesario acumular y analizar sus variables discretas.

Pobreza energética

Se podría definir como la situación en la que se encuentra una familia, en que las necesidades básicas energéticas no pueden ser satisfechas, como consecuencia de un nivel de ingresos insuficiente o por falta de infraestructura que le preste un servicio. Durante los últimos 40 años se han realizado numerosos estudios académicos con el objetivo de analizar y controlar su comportamiento. Una de las primeras investigaciones fue la de [6]. En esta se plantea la definición de que una familia está en pobreza energética si tiene que gastar más del 10% de sus ingresos en energía para lograr satisfacer las necesidades básicas de su hogar; el autor argumenta que la pobreza energética es una forma distinta de pobreza, no simplemente un aspecto o consecuencia directa del empobrecimiento general. Lo que permite esquematizarla en 03 premisas, representada en la Figura 1 como: (01) Ingreso económico familiar, (02) Uso de la energía, (03) Costo de la energía, esta última será la que abordemos en el presente artículo. Ya que de acuerdo con [7] La pobreza energética afecta al sector de la energía, pero también a otros como la salud, el consumo o la vivienda, el desarrollo de la sociedad.

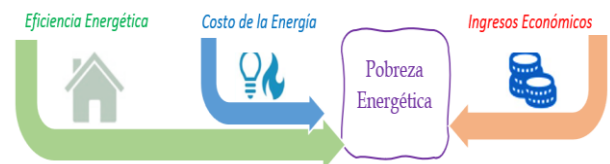


Figura 1: POBREZA ENERGÉTICA

Considerando lo establecido por [8], quien demostró que la forma de medir la pobreza energética había fallado, ya que se subestimó el problema cuando el costo de la energía era bajo y sobreestimó la escala del problema cuando era alto. Esto difiere en función del grado de desarrollo de los países, en los desarrollados se analiza desde la perspectiva del sobreesfuerzo o capacidad de pago de la energía y en los países subdesarrollados, se trata de un problema de acceso a las fuentes de energía, gas y electricidad.

Este tema se debe considerar en la transición energética en Venezuela, ya que es un factor de relevancia. No se puede abordar de la misma manera como hasta ahora se ha efectuado, pues la sociedad venezolana no es la misma de hace 20 años, y cualquier cambio que se realice en el

costo de la energía se convertiría en un factor determinante; algunas personas son pobres, pero pueden permitirse una energía mínima, este sería el caso de algunos pueblos donde no se cuenta con el servicio. Otros, con ingresos por encima de la línea de pobreza aceptada, no se podrán permitir el lujo de usar la energía ineficientemente, esto podría ser la población en los barrios de los centros urbanos del país. También podría existir un extracto de la sociedad que solo puede tolerar un costo mínimo de la energía, la actual clase media venezolana. Para determinar si una familia se encuentra o no en situación de pobreza energética, es necesario tener en cuenta sus gastos en energía y otros productos básicos, la adecuación de su entorno social y sus ingresos. Por lo tanto, es un concepto difícil de abordar en la práctica.

Costo de la energía en Venezuela

Es imprescindible un cambio disruptivo del actual modelo de costo que permita una transición energética, abordar el cambio climático y permita un libre mercado, regulado por un Price-cap, tomando en cuenta la realidades de nuestro país, considerando las grandes inversiones requeridas para la recuperación del [SEN] a condición operativa, que permita apalancar la reactivación económica, pero sin perder la perspectiva de que cualquier variación de los costos que se tomen representará un impacto significativo en la estructura de costo de la sociedad. El suministro

de energía presenta una tendencia global de competitividad económica, conllevando a un cambio de paradigma en los prestadores de servicio. Con base en [9], esta concepción da lugar a una nueva perspectiva, contribuyendo con la sostenibilidad ambiental, con recursos naturales escasos, por lo que los modelos en la actualidad son insostenibles a mediano y largo plazo.

Es importante estudiar los modelos matemáticos usados en otros países para poder realizar una propuesta, basados en las necesidades actuales; entendiendo como sería el comportamiento en el [SEN], representado en la Figura 2

Siendo la columna vertebral el sistema de 765 kV que nace en el patio de transmisión de Guri y está constituido por (07) subestaciones, interconectadas por (13) líneas de transmisión, tiene su origen en la subestación Guri, Máquinas 11 a 20, es decir, una generación máxima de 7080 MW Y casa de máquinas 1, donde se interconectan desde el patio de 400 kV a través de 3 autotransformadoras de 765 / 400 kV

El diseño del sistema a 765 KV se basó en el criterio de mantener la estabilidad transitoria del sistema y la estabilidad de voltaje ante falla permanente de uno de los subsistemas, de esta forma se definieron dos sistemas: el emisor y el receptor, con cuatro subestaciones cercanas a las cargas (Omz, la Horqueta, la Arenosa e Yaracuy) y dos subestaciones intermedias (Malena y San Gerónimo) para control de voltaje y estabilidad.

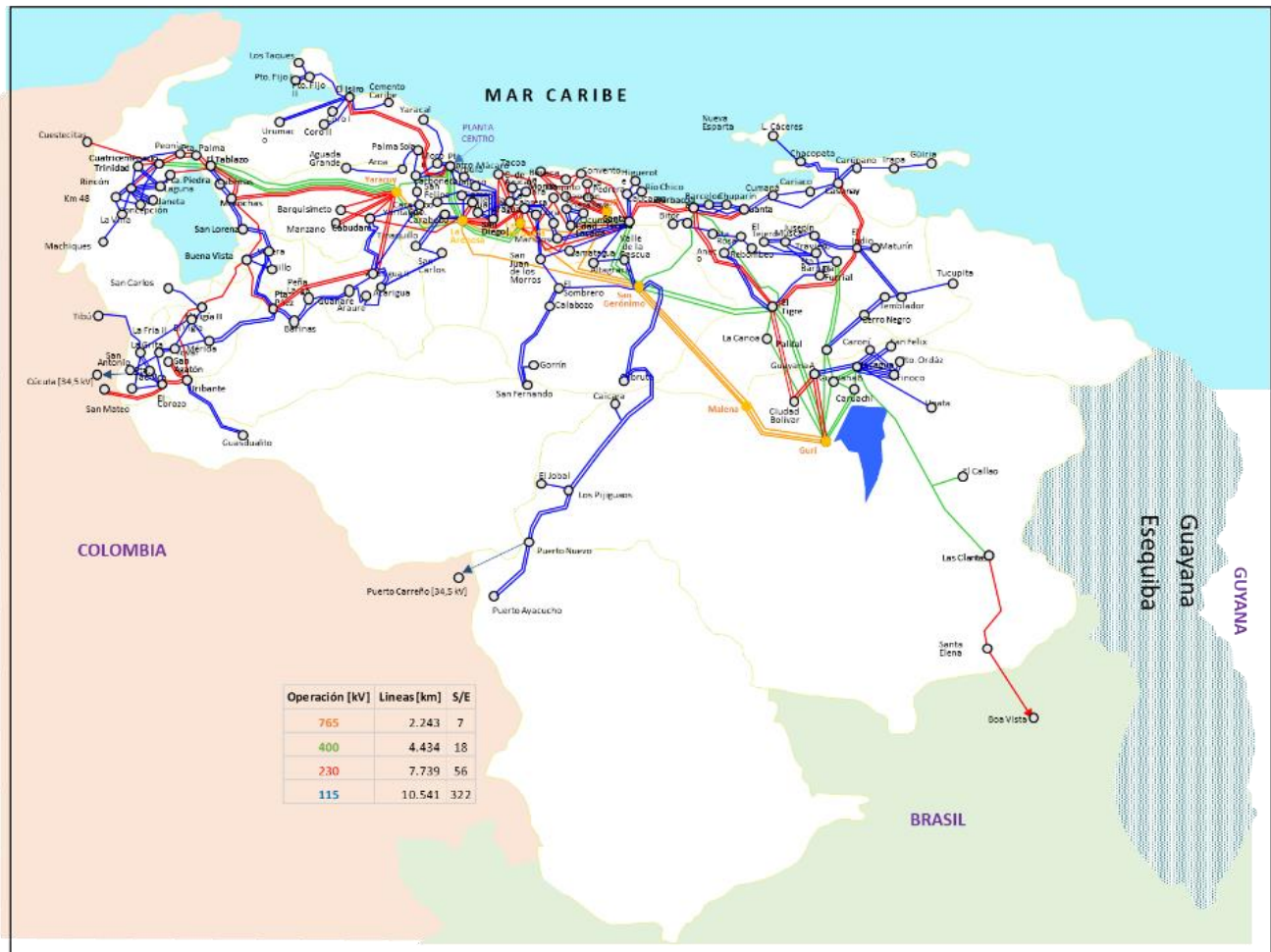


Figura 2: SEN, VOLTAJES DE OPERACIÓN Y PUNTOS DE EXPORTACIÓN

Desde la perspectiva de un prestador de servicio eficiente, dejando por fuera la solución de otros problemas económicos, como son el sueldo mínimo y el poder adquisitivo de los venezolanos, los cuales deben ser abordados en otro tipo de investigaciones. Como afirma [7], las tarifas aplicadas actualmente por el prestador de servicio, no llegan a cubrir los costos asociados a la generación, transmisión y distribución de la energía, lo que conlleva en insuficiencias presupuestarias que se reflejan en un deterioro y/o ausencia del servicio.

En la actualidad, es regulado con un modelo lineal, establecida por [10] donde se definen los criterios para la determinación de las tarifas del servicio y los procedimientos de control. En base al rendimiento de la inversión, constituida por todos los bienes que directa o indirectamente sean necesarios en el proceso. La última

actualización fue en el 2002 [11], es decir, que tiene 21 años sin cambios, con otras resoluciones se han definido recargos adicionales a la factura, a la fecha están vigentes. Adicionalmente, la tasa cambiaria inicial era 1.308,95 Bs/USD. Posteriormente en el 2007 los prestadores de servicios privados y públicos de distribución y transmisión quedan eliminados con la creación de Corpoelec, adicionalmente los costos son ajustados con las reconversiones monetarias del 2008, 2018 y 2021. Por consiguiente, se le han retirado 14 ceros al Bolívar, deduciendo con esto el por qué la deficiencia en el servicio, donde prácticamente es gratis, convirtiéndolo en el más bajo del mundo. De acuerdo con [12], el modelo es para un mercado centralizado, monopólico y tipo binómica:

$$Y = [kWh + kVA]FAP + kwh * CACE \quad (01)$$

Donde
 KWh =Bs por Energía
 KVA = Bs por Demanda
 CACE = Cargo por Ajuste de Combustible y Energía.
 FAP = Factor de Ajuste de Precios

Con base en [13] la energía hidroeléctrica del bajo Caroní, se comercializaba a los diferentes clientes primarios, empresas básicas, industrias privadas; en la actualidad más del 70% de la energía que se consume en Venezuela es de esta hidroeléctrica. El poder exportar energía, debería ser lo primordial a recuperar en el [SEN], ya que en su momento eran bien representativo económicamente y en este momento coyuntural, el poder participar en los mercados internacionales, en primera instancia puede ayudar a las regiones más afectadas por falta de generación térmica, representada en la Figura 2, a través de Colombia en: Cuatricentenario (Zulia) - Cuestecita [230 kV - 150 MW]. La Fría (Táchira) - Tibú [115 kV - 36 a 80 MW]. El Corozo (Táchira) - San Mateo [230 kV - 150 MW]. Guasualito (Apure) - Arauca [34,5 kV - 6 MW]. Puerto Nuevo (Bolívar) - Puerto Carreño [34,5 kV - 7.5 MW] y para Brasil en: Santa Elena (Bolívar) - BoaVista [230 kV 200 MW]. Muchas de estas infraestructuras, contratos y estado actual de operación, son intermitentes y no se conoce mayor información al respecto. Adicionalmente, el modelo para determinar estos costos no está en documentación académica, normas y procedimientos para validarlas; pero partiendo de lo establecido por [14] quienes describen las condiciones para una solución de estos subsistemas, caracteriza las estimaciones, los parámetros, además de las investigaciones de [15], el de [16] y lo descrito por [17] dando como resultado un conjunto de ecuaciones similares a las argumentadas en la investigación de [18] de modelo de alícuota de la energía. Además, [19] plantearon la simulación y modelado de las centrales hidroeléctricas del bajo Caroní, sin huella de carbono [HC], en los actuales momentos, esto no sería así, pero permitió establecer los costos [USD/kWh] básicos iniciales:

$$Y = 15 + 1.4X + 0.04X^2 \approx 0.0085 \quad (02)$$

Comparando la ecuación 02 condiciones operativas, podemos inferir el por qué fue rentable.

Alícuota de la Energía

Teniendo en cuenta las investigaciones de [20], donde se innova con un concepto alícuota de la energía, el cual procura integrar el costo de la energía y la [HC], incluyendo el [SCC], que permita la regulación para el prestador de servicio y puedan ser más eficientes; al interrelacionar en tres dimensiones (costos, energía y CO₂), partiendo de un modelo de tiempo discreto, su posible solución y estimar las vías óptimas en base a un algoritmo, es relevante en los actuales momentos, de casos de investigación parecidos a lo que se buscan, por lo que es necesario realizar simulaciones en diferentes aplicaciones para la convalidación del siguiente sistema de ecuaciones:

$$Y = C_0 + C_1X + C_2X^2 + C_3e^{kX} \quad (03.a)$$

$$Z = C_0 \pm C_3e^{kX} \quad (03.b)$$

Donde:

Y = costo [USD]

X = energía [kW, Tep]

Z = huella de Carbono [CO₂-eq]

k = contante de proporcionalidad ambiental pesimista u optimista

Las restricciones vienen dadas por los coeficientes, Tabla I, desde la expectativa de los stakeholders:

Tabla I: Coeficientes de la Alícuota

	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	K
Prestador de Servicio	B ₀				
Condiciones económicas	a _i	b _i	c _i		
FNCE	LCOE				
Emisión Atmosférica	α _i	β _i	γ _i	η _i	δ _i
Costo Social del Carbono	CLI				k

El modelo de Alícuota propuesto, con varios subsistemas, los cuales involucran soluciones óptimas a los coeficientes, variando según los casos específicos, esto es debido a que no se pretende que el costo de la energía sea igual en una comunidad rural como en una empresa de alto consumo y gran impacto ambiental. Se puede visualizar el modelo, en función de los coeficientes, en la Figura 3, incluyendo la cuantificación de la [HC], Que según [21] ya que existen más de 35 modelos, que conllevan a un Impuesto al Carbono. El costo social del carbono

[SCC] [22] basado en la (CLI) dinámica climática con los entornos energéticos, además que la pobreza energética puede ser una condición en la función objetivo de la ecuación 03, un sistema no lineal, sujeto a restricciones de optimización, dependiendo de las expectativas de costo de los stakeholders y condiciones determinadas por cada caso. Con base a [23] Las simulaciones, Tabla II, sugieren un impacto positivo, ya que estimularían las fuentes no convencionales de energía [FNCE] para la transición energética. Obteniendo:

Tabla II: Simulación óptima de los Coeficientes de la Alícuota

			Mínim o	Máxim o	Rango
Económicos	a	C ₀	94,71	1.760,4	1.665,7
	b	C ₁	3,33	12,90	9,57
	c	C ₂	0,00	0,52	0,52
	d	C ₃	80,00	300,00	220,00
	e	k x10 ⁻³	35,00	98,00	63,00
Ambientales [10 ⁻³]	α	C ₀	50,00	520,00	470,00
	β	C ₁	-4,34	-1,11	3,23
	γ	C ₂	0,00	1,84	1,84
	η	C ₃	0,50	1,42	0,92
	δ	k	0,02	0,07	0,05

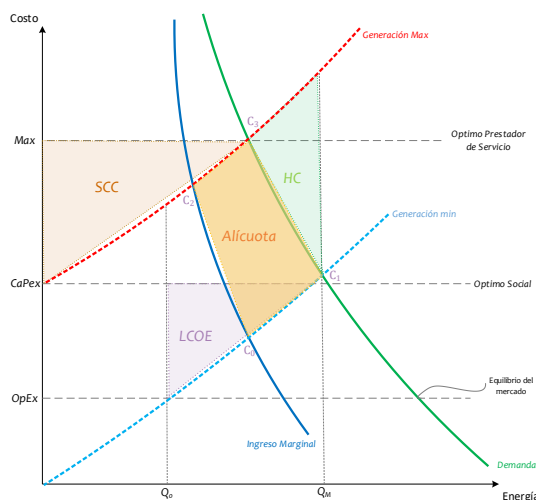


Figura. 3: ALÍCUOTA ÓPTIMA

Subsidio Energético

Una externalidad de relevancia para la propuesta, según [24] se define como la asistencia económica y de duración determinada, que permite regular el costo de la energía, lo que

conlleva a subvenciones de alguno de los stakeholders; esta temática es sumamente compleja de argumentar, ya que conlleva aspectos sociales no abordados en esta investigación, pero de la Ecuación 03, se puede establecer:

$$\frac{\partial f}{\partial x \partial y} = \frac{\partial f}{\partial y \partial x} = C_0 + C_2 X - Y = 0 \tag{04}$$

Los aspectos ambientales se limitan a establecer si genera o no [HC]. Teniendo en cuenta a [25] puede incentivar el consumo excesivo, contribuyen a otras distorsiones económicas, esto puede tener implicaciones negativas para la transición energética; ya que reduce el incentivo para invertir en las [FNCE], por lo que deben minimizarse, en función de reducir el consumo de energía. Esto puede ser una de las barreras a superar para poder recuperar el [SEN]. De acuerdo con las investigaciones de [26] La eliminación de subsidios a los servicios es un tema impopular, políticamente difícil, pero inaplazable. Existen varios dilemas relacionados con este tema. Por un lado, importantes sectores de la población serán incapaces de afrontar un aumento de costos que elimine total o parcialmente los actuales subsidios.

Análisis Propuesto

Para la cuantificación de la Alícuota de la energía, son necesarias soluciones dinámicas, con parámetros reales; es por esto que con ayuda de una simulación de Sistemas de potencia, [27] se representaron las restricciones, pérdidas por trasmisión, los niveles de voltajes, distancias de las líneas de trasmisión, factores que son significativos para la estimación final de los costos en las cargas más lejanas de los centros de generación, representados en la Figura 4, basado en [28], limitada al troncal principal, donde se quiere convalidar y evaluar diversas situaciones, condiciones, características para escenarios específicos de flujo de carga óptimo, permitiendo conocer las condiciones de operación del mismo bajo una condición de carga determinada, partiendo del centro de Generación y su interrelación con el [SEN] 765/400/230/115 kV.

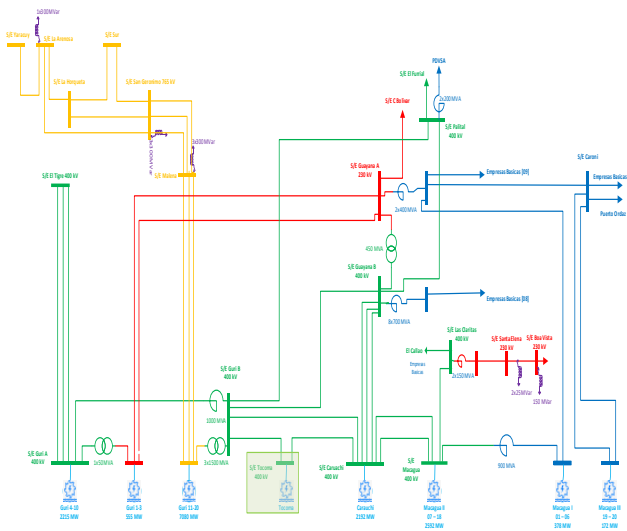


Figura 4: DIAGRAMA UNIFILAR PRINCIPAL DESDE EL CENTRO DE GENERACIÓN

Se efectuó una simulación de flujo de carga del sistema de potencia, con las características esenciales de manera que se pueda convalidar un nuevo modelo de alícuota de la energía, y su influencia en el [SEN] resultando fundamental, pues permite evaluar diversas situaciones y condiciones del sistema, analizar sus características, y ensayar operaciones o maniobras del mismo durante contingencias o escenarios específicos de carga. Se abordaron solamente las subestaciones más importantes, con ayuda del software ETAP (Electrical Transient and Analysis Program, Programa Analizador y Transiciones Eléctricas), [27] el cual los módulos de simulación que admiten una amplia gama de parámetros determinantes en el funcionamiento de los elementos se realizaron estudios de flujo de carga, con gran precisión en lo que a semejanza con la realidad se refiere. puede considerarse el estudio más importante a realizar en el diagnóstico de un sistema de potencia, ya que permite conocer las condiciones de operación del mismo bajo una condición de carga determinada. En el presente estudio se empieza por el sistema de transmisión a 765 kV, este nivel se usa ya que una mayor tensión resulta más eficiente para transmitir energía, este tiene su origen en la subestación Guri B, que cuenta con una capacidad de generación total instalada de Los datos obtenidos, basados en el flujo óptimo, permitieron acoplar las ecuaciones planteadas e ir probando los coeficientes y el cálculo relacionado con el costo de energía, bajo condiciones de

7300 MVA. Se extiende hacia el centro del país mediante tres líneas que llegan hasta la subestación San Gerónimo.

Es importante resaltar que la simulación, inicia con un bosquejo detallado de todo el sistema 765 kV, completo, está exclusivamente enfocada hacia la realización exitosa del análisis de flujo de cargas del sistema. Además, cabe destacar, que los datos de entrada que determinan condicionalmente el desempeño operativo de los elementos del sistema, fueron estimados en base al acondicionamiento de escenarios factibles de generación y carga

Se presenta una alta rigurosidad en lo que se refiere a los parámetros pertinentes al nivel de tensión de los elementos, en función de que converja el modelo de costos propuesto, la ejecución del análisis de flujo de cargas optimo. Se logró condicionar la red a todos los escenarios de carga planteados, que comprenden casos que van desde el 1% hasta el 40% de la potencia demandada nominal atribuida a las exportaciones de potencia de la red. Este acondicionamiento se hizo en base al rango de tensiones permitido para valores nominales de 400/ 230 kV hasta ciertos casos especiales en 115 kV

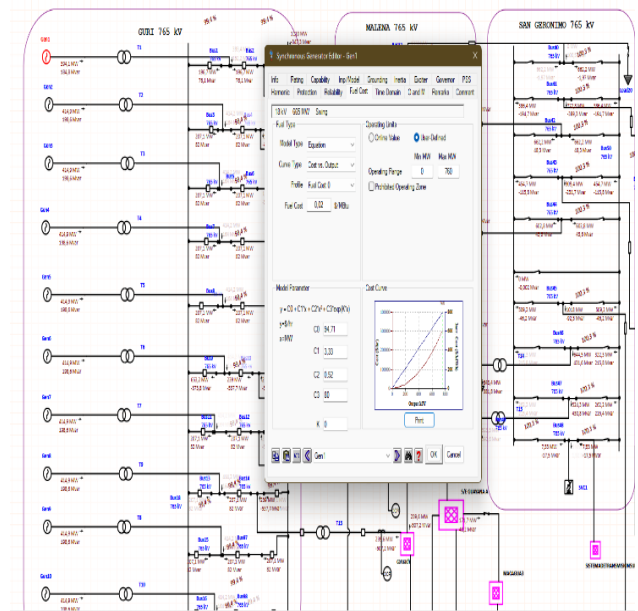


Figura 5: SIMULACIÓN DEL MODELO DE ALÍCUOTA

operación, capacidad nominal, factor de potencia y tensión nominal, para él [SEN] simulado y representado en la Figura 5. Verificando su

operación, lo que permitió validar, para este caso base, las ecuaciones:

$$Y = 94,71 + 3.33X + 0,52X^2 + 80e^{-X} \quad (05.a)$$

$$Z = 0.05 \pm 0.005e^{-0.0098X} \quad (05.b)$$

Para los valores de Z, se puede estimar que, en los actuales momentos, tal como está simulado el

sistema, se tiene un SCC = 17.81 [USD/CO₂-eq] por cada MW. Se observan los resultados, por regiones establecidas en función de la distancia, considerando las restricciones de transmisión del sistema de potencia:

Tabla III: Resultados de simulación dinámica estocástica de la Alícuota

Región	Estado	Lineas [Km]	S/E 765 kV	Oper [kV]	Dem. min [MW]	Subsidio [kWh]	[USD/kWh]		
							min	Rango	Max
Guayana	Bolívar	0		400-115	1100	700	0,013	0,031	0,046
	Anzoátegui			400-115	590				
Oriente	Sucre	400	Guri	230-115	274	600	0,034	0,053	0,068
	Monagas		Malena	400-115	490				
	Delta Amacuro			115	270				
Insular	Nueva Esparta	500		115	244	900	0,052	0,061	0,083
	Caracas			230-115	925				
Capital	Vargas	450	Sur	230-115	170	600	0,034	0,052	0,068
	Miranda			400-115	600				
Amazonas	Amazonas	900		115	90		0,057	0,066	0,097
	Guárico		San	400-115	290				
	Cojedes		Gerónimo	115	250				
	Portuguesa			115	200				
Central	Aragua		La Horqueta	230-115	600	700	0,044	0,063	0,078
	Carabobo	1000	La	400-115	1200				
	Lara		Arenosa	230-115	180				
	Yaracuy			230-115	350				
	Falcon			230-115	250				
	Apure			230-115	350				
	Barinas		Yaracuy	230-115	280				
Andina	Mérida			230-115	185	500	0,168	0,229	0,450
	Táchira	1300		230-115	210				
	Trujillo			230-115	155				
Zulia	Zulia	1400		400-135	1740	1300	0,108	0,169	0,390

En la tabla III, se observa un comportamiento del modelo propuesto, por regiones establecidas en función de la distancia con el centro de generación, considerando las restricciones actuales del [SEN], asumiendo que la generación

térmica es casi nula, dando como resultado valores que permiten convalidar la investigación, destacando:

La distancia en km, a medida que la mayor carga se presenta en los extremos del [SEN] el sistema se vuelve inestable, por lo que fue necesario establecer valores de demanda mínima [MW] los cuales distan de los valores máximos históricos registrados. Los valores de subsidio [kWh/mes], provienen de los intentos por parte de CORPOLEC de normar esta situación, en el 2014 cuando se instauró un Plan Banda Verde y con una gran opacidad, en su momento se definió como objetivo un cambio cultural en la población que permitía medir la importancia de hacer uso consciente, racional y eficiente de la energía dado el costo económico y humano que acarrea producir la electricidad y su impacto ambiental, por lo que está dirigido al sector residencial, pero no se ha podido encontrar para esta investigación una fuente oficial que sirva de basamento académico que permita analizar la metodología de cálculo para llegar a estos valores, se encuentra con el hallazgo de que el este valor de subsidio debe estar limitado en función de las condiciones reales del [SEN] y en función del que el modelo de alícuota propuesto converja y no de errores en las simulaciones; los valores en comparación con simulaciones lineal se aproximan.

Los resultados del modelo de Alícuota, en conjunto con los principios del Price-cap [29] puede ser un referente para la recuperación del [SEN] con lo que se garantizaría la rentabilidad de las inversiones de los stakeholders e incluso exportar energía en los puntos donde existió la infraestructura. El de más rápida recuperación y rentable es hacia Brasil, el suministro a la ciudad brasileña de Boa Vista, en su momento ELECTRONORTE, Roraima, único estado brasileño no conectado a la red nacional de transmisión, por lo que se construyó una infraestructura para venderle energía [200 MW máx.], en los actuales momentos a un precio mucho menor al promedio brasileño y las operaciones están por el orden de los 40 MW/mes, y el contrato venció en diciembre del 2021. Para los estados Nueva Esparta y Amazonas, alimentados en 115 kV, la demanda no puede crecer por restricciones del sistema de transmisión, adicionalmente, por las pérdidas no técnicas, pobreza energética, pero con un gran potencial de crecimiento, serán un gran reto para el prestador de servicio. En las regiones más

alejadas del centro de generación, Andina y Zulia, donde la alimentación principal debería ser de las Termoeléctricas, los resultados de la simulación indican que se debería buscar la alternativa de importar energía desde Colombia, faltando detalles técnicos para su optimización. No se tiene con certeza el alcance de todas las inversiones necesarias para la recuperación del [SEN] a condiciones de 20 años atrás, se puede encontrar mucha información no oficial y/o opiniones personales sin ningún basamento científico, pero según [30] indica lo crítico de la situación. Por lo que es necesario mejorar los datos de la simulación con las condiciones de las plantas termoeléctricas conectadas.

Conclusiones

La principal conclusión es que se deben incentivar más investigaciones académicas de este tipo, en un tema de tanta relevancia para la recuperación económica de Venezuela, ya que en los últimos 30 años se han omitido detalles técnicos de relevancia, conllevando a grandes errores, por lo que serán necesarios cambios disruptivos en cómo se manejaba el negocio, apuntando a un libre mercado energético; pero quizás el mayor problema sea el desconocer con certeza el alcance, ya que en la actualidad existe mucha información informal y opiniones de cuánto serían las inversiones reales para la recuperación del [SEN], la poca que se encuentran es sin basamento científico, no se indica cómo se podrán recuperar estas inversiones y quizás sea esto el mayor obstáculo a vencer, ya que conlleva a nuevo modelo de costo de la energía. Enfatizando que las posibles soluciones dependerán del tipo de energía que se esté simulando en el sistema de Alícuota incluso para control del gas natural

Una de las maneras de poder verificar si la aplicación del Modelo de Alícuota es aceptable es comparándola con Levelized Cost of Electricity [LCOE] En base a los elementos que comprende cada central hidroeléctrica operativa del bajo Caroní, permitiendo analizar: Cuánto sería la inversión, los recursos que se requieren para la recuperación de las instalaciones, aumentar la capacidad instalada o mejorar la eficiencia de las plantas existentes, resultado en promedio de 0.014 USD/kWh lo cual es un valor competitivo, como resultados de las simulaciones iniciales, en este escenario presentado se omiten algunas condiciones reales, ya que es difícil el acceso a la

información por la opacidad del actual ente regulador, es necesario información exacta, para cada una, pero es una base de partida.

Referencias

- [1] Asamblea Nacional, "Comisión Mixta Para El Estudio De La Crisis Eléctrica En El País Informe Final", *Imprenta Nacional de Venezuela*, p. 200, 2017.
- [2] H. Rudnick, "Desarrollo Del Sector Eléctrico, Competencia Y Regulación, Seguridad De Abastecimiento.", *Pontificia Universidad Católica de Chile*, 1999.
- [3] B. K. Sovacool, "How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions", *Energy Res Soc Sci*, vol. 13, pp. 202–215, mar. 2016.
- [4] S. Arrhenius, "On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground". *Philosophical Magazine*, pp. 22–102, 1896.
- [5] W. D. Nordhaus, *The Spirit of Green: The Economics of Collisions and Contagions in a Crowded World*, núm. 5086. PRINCETON UNIVERSITY PRESS, 2021.
- [6] J. Bradshaw y S. Hutton, "Social policy options and fuel Poverty", *J Econ Psychol*, 1983.
- [7] S. Santillán, "La pobreza energética en el contexto de la liberalización y de la crisis económica", Bruselas, 2011.
- [8] J. Hills, "Fuel Poverty Report", *London School of Economics*, 2012.
- [9] A. Galetovic, "Notas sobre regulación por Empresa Eficiente", *Universidad de Chile*, p. 9, 2009.
- [10] Asamblea Nacional, "Normas para la determinación de las tarifas del servicio Eléctrico", *Imprenta Nacional de Venezuela*, Art. núm. Gaceta oficial de la Republica, N° 34.321, jun. 1989.
- [11] Asamblea Nacional, "Resolución mediante la cual se fijan las tarifas máximas que aplicarán las empresas eléctricas", *Imprenta Nacional de Venezuela*, Art. núm. Gaceta Oficial N° 37.415, abr. 2002.
- [12] R. Bitu y P. Born, *Tarifas De Energía Eléctrica: Aspectos Conceptuales Y Metodológicos*, 1 Edition. Quito: OLADE, 1993.
- [13] Transparencia Venezuela, "Informe Empresas Propiedad del Estado Venezolano Corpoelec", Caracas, 2015.
- [14] M. E. El-Hawary y E. Kumar, "Optimal Parameter Estimation for Hydro Plant Performance Models in Economic Operation Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRS-1, 1986.
- [15] A. F. Glimn y L. K. Kirchmayer, "Economic Operation or Variable-Head Hydroelectric Plants", *AIEE Trans*, 1958.
- [16] Hildebrand C. E., "The Analysis of Hydroelectric-Power Peaking and Poundage by Computer", *AIEE Trans*, 1960.
- [17] N. Arvanitidis y J. Rosing, "Composite Representation of a Multi reservoir Hydroelectric Power System", *IEEE Trans*, vol. PAS-89, 1970.
- [18] E. Perez y S. Velásquez, "Modelar una Alícuota de la Energía", Puerto Ordaz, 2023.
- [19] S. Velásquez, P. Durrego, y L. Viscaya, "Desarrollo de una Aplicación para el Modelado y Simulación Energética de las Centrales Hidroeléctricas del Bajo Caroni", *Unexpo*, mar. 2017.
- [20] E. Perez, "Algoritmo para incluir la huella carbono en los costos de energía [Tesis de Doctorado]", UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela, 2023.
- [21] L. Galindo, A. Beltran, J. Carbonell, y J. Alatorre, "Efectos potenciales de un impuesto al carbono sobre el producto interno bruto en los países de América Latina", *Cepal*, p. 48, 2017.
- [22] W. Nordhaus, "SCC Estimates: Concepts, DICE Model Results.", *Chicago University*, 2014.
- [23] The MathWorks Inc, *Global Optimization Toolbox Matlab*. Natick, MA. USA: The MathWorks, Inc, 2020.
- [24] M. Canesa, "La Tarifa Social de la Energía en América Latina y el Caribe", *OLADE*, 2013.
- [25] V. Aryanpur *et al.*, "Ex-post analysis of energy subsidy removal through integrated energy systems modelling", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, abr. 2022.
- [26] R. Key *et al.*, "Reducir los Subsidios a los Servicios en Venezuela", Caracas, 2019.
- [27] H. Madhusudan, *Power Systems Analysis Illustrated with MATLAB and ETAP*. Boca Raton, FL. USA: CRC Press, 2019.
- [28] L. Ceballos, "Sistema de Transmisión 765/400 kV Venezolano", Caracas,

- Venezuela: Academia Nacional de Ingeniería y Habitación, oct. 2019.
- [29] S. Cowan, "Price-cap regulation", *Oxford University*, 2002.
- [30] A. González, "La guerra eléctrica de Maduro, mentiras y verdades", abr. 2019.