



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Recomendaciones para afrontar los impactos de las fuentes de energía renovables no convencionales sobre la transmisión de energía eléctrica en Colombia

Camila Andrea Puentes García

Trabajo final presentado como requisito parcial para obtener el título de:
Magister en Ingeniería - Sistemas Energéticos

Director:

Carlos Jaime Franco Cardona

Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín
Facultad de Minas
Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2020

Resumen

La energía es indispensable para el desarrollo económico, social y cultural de un país. El crecimiento de su población, la expansión inminente del sector industrial, el acelerado crecimiento tecnológico, entre otros, requieren un sistema eléctrico robusto y confiable con estándares de calidad y disponibilidad para garantizar la continuidad de estas actividades. Debido a esto, ha cobrado sentido el uso de recursos de generación de carácter renovable, que permitan diversificar la canasta energética y de esta manera, reducir la vulnerabilidad del sistema eléctrico actual a cambios climáticos. En Colombia, la integración de las fuentes de energía renovables no convencionales cada vez se presenta con más fuerza, al punto de empezar a sentar las bases que justifican la adopción de una estrategia para su desarrollo. Esta adopción ejerce responsabilidades de planeamiento y desarrollo de infraestructura que traen consigo retos para la transmisión y que impactarán la estrategia de las empresas dedicadas a dicha actividad, en donde, de cara a las nuevas tendencias del sector, podrían enfrentarse a características diferentes de mercado, las cuales podrían afectar las variables de ingreso, sostenibilidad y crecimiento de los negocios actuales y futuros. Este proyecto pretende contribuir al debate y la toma de decisiones sobre la inclusión de las renovables no convencionales en el negocio actual de la transmisión de energía eléctrica en Colombia.

Palabras Clave

Energías renovables no convencionales, transmisión de energía eléctrica, sistema eléctrico, transición eléctrica.

Abstract

Recommendations to face the impacts of non - conventional renewable energy on the electric power transmission in Colombia.

Energy is essential for the economic, social and cultural development of a country. The growth of its population, the imminent expansion of the industrial sector, the accelerated technological growth, among others, require a robust and reliable electrical system with standards of quality and availability to guarantee the continuity of these activities. Due to this, the use of renewable generation resources has become meaningful, allowing to diversify the energy. Basket and, in this way, reduce the vulnerability of the current electrical system to climate changes. In Colombia, the integration of non-conventional renewable sources is becoming more and more intense, to the point of beginning to lay the foundations that justify the adoption of a strategy for their development. This adoption requires planning and infrastructure development responsibilities that bring with them challenges for the transmission and impacts the strategy of the companies dedicated to this activity, where facing the new tendencies of the sector, they could confront to different market characteristics, which could affect the variables of income, sustainability and growth of the current and future businesses. This project aims to contribute to the debate and decision – making on the inclusion of non-conventional renewables energy in the actual business of electric power transmission in Colombia.

Keywords

Non-conventional renewable energy, energy power transmission, electric power system, electrical transition.

Tabla de contenido

Resumen.....	2
Palabras Clave	2
Abstract	3
Keywords.....	3
Tabla de contenido	4
Introducción	9
1. Antecedentes	11
1.1. Introducción del capítulo	11
1.2. Contexto Internacional	11
1.3. Contexto Nacional.....	12
1.4. Conclusiones	19
2. Marco Teórico	20
2.1 Introducción del capítulo	20
2.2 Generación del SIN.....	20
2.3 Fuentes de energía renovables no convencionales - FERNC.....	21
2.4 Sector Eléctrico en Colombia	22
2.5 Transmisión	24
2.6 Conclusiones	26
3. Revisión de Literatura	27
3.1 Introducción del capítulo	27
3.2 Marcos de las Energías Renovables	27
3.2.1 Red Eléctrica de España (REE).....	27
3.2.2 ACCIONA.....	28
3.2.3 XM	29
3.3 Conclusiones	30
4. Objetivos	32
4.1 Objetivo General	32
4.2 Objetivos Específicos.....	32
5. Impactos de las Energías Renovables No Convencionales	33
5.1 Introducción del capítulo	33
5.2 Impactos sobre el Sistema de Transmisión Nacional	33

5.2.1	Perfil de tensión	33
5.2.2	Confiabilidad	34
5.2.3	Pérdidas.....	34
5.2.4	Capacidad de transferencia de potencia	35
5.2.5	Protecciones eléctricas	35
5.2.6	Regulación	36
5.2.7	Planeamiento	36
5.3	Impactos sobre las Empresas Transmisoras	37
5.3.1	Inversiones e Ingresos.....	37
5.3.2	Cultura.....	38
5.4	Conclusiones	39
6.	Conclusiones y Trabajos Futuros	40
6.1	Conclusiones asociadas con el logro de los objetivos definidos.....	40
6.1.1	Objetivo específico 1.....	40
6.1.2	Objetivo específico 2.....	40
6.1.3	Objetivo general.....	41
6.2	Trabajos Futuros	42
7.	Bibliografía	43

Lista de Tablas

Tabla 1 Fuentes de Energía Colombia.....	14
Tabla 2 Crecimiento de la Demanda Energía Eléctrica (%)	15
Tabla 3 Total Líneas de Transmisión STN.....	25

Lista de Figuras

Ilustración 1 Capacidad del SIN.....	13
Ilustración 2 Proyección de la Demanda Energía Eléctrica (GWh)	16
Ilustración 3 Generación del SIN.....	20
Ilustración 4 Evolución de la generación en Colombia	21
Ilustración 5 Estructura Institucional del Sector Eléctrico	23
Ilustración 6 Estructura XM.....	24

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
FERNC	Fuentes de energía renovables no convencionales
UPME	Unidad de planeación minero energética
XM	Compañía de expertos en mercado
CREG	Comisión de regulación de energía y gas
PCHs	Pequeñas centrales hidroeléctricas
TN	Transmisores nacionales
OR	Operador de red
STN	Sistema de transmisión nacional
SIN	Sistema interconectado nacional
MINMINAS	Ministerio de minas y energía de Colombia
GCD	Grandes consumidores de energía
GE	Generación distribuida
OEF	Obligaciones de energía en firme
SSPD	Superintendencia de servicios públicos domiciliarios
CND	Centro nacional de despacho
LAC	Liquidador y administrador de cuentas
ASIC	Administrador del sistema de intercambios comerciales
MEM	Mercado de energía mayorista

Introducción

La dependencia mundial en el petróleo, el carbón, el gas natural y aún en los combustibles nucleares, como recursos fósiles disponibles en cantidades abundantes pero finitas, sumado a las coyunturas económicas y geopolíticas asociadas, han generado en muchos países la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, que a su vez contribuyan a la reducción de emisiones de efecto invernadero y la mitigación del cambio climático que viene experimentando el planeta (Holguin Ramírez, 2018).

Las fuentes de energía renovables representan grandes potenciales energéticos para ser aprovechados de una manera eficiente y económica, en la medida en que su investigación, desarrollo y despliegue comercial continúen avanzando. Varios países alrededor del mundo se comprometieron a instalar tecnologías para el aprovechamiento de la energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y biomasa, como fuentes de origen renovable para hacer su aporte en el proceso de transformación de la matriz de generación de energía eléctrica (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2015).

El desarrollo de tecnologías para el uso de la energía hidráulica, solar, eólica, geotérmica y de la biomasa por parte de países como China, Dinamarca, Alemania, Estados Unidos y Brasil, entre otros, sumado a la disponibilidad de al menos una de tales fuentes en prácticamente cualquier posición geográfica del planeta, y la abundancia relativa de algunas de estas fuentes en un país como Colombia, se presentan como oportunidades para diversificar la canasta energética nacional y gradualmente transformar su sector energético hacia un modelo cada vez más competitivo, sostenible y confiable (Holguin Ramírez, 2018).

Colombia es un país que cuenta con una matriz energética abundante tanto en combustibles fósiles como renovables, pero la alta dependencia de la canasta energética doméstica de combustibles líquidos derivados del petróleo y del gas natural, lleva a pensar en la importancia del desarrollo de fuentes alternativas de energía que puedan sustituir por lo menos el uso de estas fuentes en los siguientes años para satisfacer dicha demanda (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2015). Por otro lado, la matriz eléctrica del país, cuenta con una participación aproximada del 66% de la energía hidroeléctrica como recurso renovable, sin embargo diversificar la canasta energética trae algunas ventajas fundamentadas en la disponibilidad de recursos, reducción en costos de inversión, y sofisticación de tecnologías como son la eólica y la solar, así como cogeneración a partir de biomasa y generación geotérmica, que comienzan a cobrar sentido para ser incorporadas en la matriz energética nacional (XM S.A E.S.P, 2019a).

De esta manera, las fuentes de energía renovables no convencionales son cada vez más relevantes para el desarrollo del sector energético en Colombia, debido no solo a las necesidades de diversificación, sino también a nuevas políticas y metas energéticas, compromisos internacionales para la reducción de emisiones, innovación tecnológica, disminución de costos, precios volátiles del petróleo, necesidad de abordar el cambio climático y la generación de nuevos campos de empleo, entre otras.

En este contexto, es necesario avanzar hacia un mejor conocimiento de los efectos vinculados a las renovables en el país, que permitan tener mayor certeza sobre el reto de transformación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), y como consecuencia en los roles de los agentes participantes del sector eléctrico. Estos últimos, se enfrentan a una transición que deberá evolucionar de manera adaptativa en concordancia con la flexibilidad que es cada vez más requerida en la red. Una operación más flexible de la red es requerida no solo para facilitar la conexión de las fuentes renovables, sino también para utilizar la infraestructura existente de manera más eficiente.

Debido a esto, es importante reunir los elementos suficientes que permitan tener mayor certidumbre sobre el impacto que este tipo de tecnología puede ocasionar en la expansión de la infraestructura de transmisión de energía eléctrica en Colombia, que en primer lugar, pueden tener el potencial de postergar planes de expansión destinados a atender el crecimiento natural de la demanda en zonas específicas del país, y en segundo lugar, la conexión de las fuentes renovables que supere la demanda local, puede sobrecargar la red de transmisión durante ciertos periodos, lo que se refleja en señales de expansión y/o repotenciación del sistema. En consecuencia, es posible que las empresas dedicadas al transporte de energía se enfrenten a características diferentes de mercado, que podrían afectar sus variables de ingreso y sostenibilidad en el corto, mediano y largo plazo, y tengan que asumir cambios en su estrategia de negocio para afrontar las nuevas tendencias del sector.

Los análisis recogidos en este trabajo pretenden ser de apoyo en la toma de decisiones requeridas para la transición que deben asumir los Transmisores Nacionales (TN), como agentes facilitadores y de soporte en el sistema eléctrico. Así como espera convertirse en un insumo para la definición de nuevos objetivos estratégicos de las empresas dedicadas a la actividad de transmisión.

El trabajo se ha organizado en siete capítulos. El primero de ellos ofrece los antecedentes que enmarcan el problema abordado en un contexto nacional e internacional, permitiendo delimitar el problema. El segundo capítulo es un marco teórico que reúne los conceptos requeridos para poder comprender las necesidades de transformación que requiere el sector eléctrico con los nuevos desafíos impuestos por la entrada de las energías renovables. El tercer capítulo comprende una revisión de la literatura de los impactos ocasionados por el desarrollo del sector de renovables en los últimos años, los diferentes retos a los que se enfrentan y las soluciones propuestas. El tercer capítulo es una revisión de la literatura sobre los impactos de las energías renovables sobre las empresas dedicadas a la transmisión de energía eléctrica y sobre la afectación de las principales variables eléctricas del STN. El cuarto capítulo comprende el objetivo general y los específicos utilizados para abordar el problema de investigación. El quinto capítulo presenta la información asociada a los impactos ocasionados por las renovables, tanto para la red como para las empresas de transporte de energía. Finalmente, el sexto capítulo ofrece unas conclusiones y recomendaciones para afrontar los impactos encontrados sobre la transmisión de energía eléctrica en Colombia dando cumplimiento con los objetivos propuestos.

1. Antecedentes

1.1. Introducción del capítulo

En un contexto mundial en el que el 81% del total de la energía consumida proviene de fuentes fósiles y tan solo un 19% de fuentes renovables, se ha evidenciado la necesidad de una estrategia de descarbonización de la economía para la próxima década, que lleva a aumentar el consumo de fuentes renovables de energía, con el fin de reducir la dependencia de los fósiles de precios altamente volátiles, disminuir las emisiones de efecto invernadero producidas por el sector energético y contribuir así a la mitigación del cambio climático (Holguin Ramírez, 2018). El desarrollo de tecnologías para el uso de la energía hidráulica, solar, eólica, geotérmica y de las biomasas, sumado a la disponibilidad de al menos una de tales fuentes en prácticamente cualquier posición geográfica del planeta, y la abundancia relativa de algunas de estas fuentes en un país como Colombia, se presentan como oportunidades para diversificar la canasta energética nacional y progresivamente transformar su sector energético hacia un modelo cada vez más sostenible.

1.2. Contexto Internacional

Actualmente, el 81% de la energía consumida a nivel mundial proviene de fuentes fósiles disponibles en cantidades abundantes, pero no finitas como el petróleo, el carbón, el gas natural y en alguna medida los combustibles nucleares (Unidad de Planeamiento Minero-Energético (UPME), 2015). Este consumo ha generado una alarma debido al impacto ambiental que suscita este proceso, considerado como uno de los mayores contribuyentes al calentamiento global y al cambio climático (Unidad de Planeamiento Minero-Energético (UPME), 2015).

Debido a esta alta dependencia de recursos fósiles, sumado a las coyunturas económicas y geopolíticas asociadas, se ha generado la necesidad de iniciar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, que al mismo tiempo contribuya al propósito de reducir las emisiones de efecto invernadero y la mitigación del cambio climático que viene experimentando el planeta. Cada vez más gobiernos, entes no gubernamentales y compañías de índole privada se suman a esta iniciativa. Algunos países como, Alemania, China, España y Estados Unidos, se posicionan hoy como los pioneros en el desarrollo de las mayores capacidades instaladas en tecnologías para el aprovechamiento de la energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y biomasas, como fuentes de origen renovable para la generación eléctrica. Por otro lado, países como Brasil, Alemania y Estados Unidos son precursores en la implementación de bioenergía en el sector transporte, otros países como China y Turquía lideran el aprovechamiento de energía térmica en forma de calor útil a partir de la energía solar y la energía geotérmica (REN21, 2019).

Dada la disponibilidad de alguna de las fuentes renovables antes mencionadas en cualquier parte del planeta, y la abundancia de una o varias de estas fuentes en ciertas regiones favorecidas, las renovables se posicionan hoy como la mejor opción de consumo y representan inmensos

potenciales energéticos para ser aprovechados de una manera eficiente y económicamente rentable en la medida en que su desarrollo, investigación, aceptación social y despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha sucedido en los últimos 40 años. (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2015).

Para garantizar la correcta inclusión de las **FERNC** dentro los sistemas eléctricos, se requieren nuevas necesidades de gestión debidas a sus características, en especial la variabilidad de su producción asociada a lo incontrolable, estacional, impredecible e intermitente que puedan ser. Esto ha llevado a un cambio de paradigma en la forma de operar y planificar los sistemas eléctricos en todo el mundo, que plantea retos no solo para el desarrollo futuro de las actividades de generación sino también para el adecuado desarrollo de las redes de alta y baja tensión. La planificación integrada de los sistemas de transporte tomando en cuenta los múltiples escenarios de generación y demanda, plantea la necesidad de redefinir los procedimientos de operación de estas redes, los criterios de expansión de las mismas, así como los patrones de uso futuro de la infraestructura de transmisión existente y la regulación que los rige (Paredes & Ramirez, 2017).

De esta manera, el sector eléctrico está llamado a ser un actor clave en la transición energética, lo que va a suponer una serie de retos que vendrán motivados por la descarbonización de la generación de electricidad y las nuevas formas de consumo que una sociedad más electrificada va a demandar.

La transición energética va a suponer un gran esfuerzo colectivo para la sociedad en general y para el sector eléctrico en particular. En efecto, la dificultad de integrar las renovables directamente en el consumo final de energía favorece que la mejor manera de aumentar su consumo sea a través de un mayor uso de la electricidad; una electricidad que debe ser de origen mayoritariamente renovable.

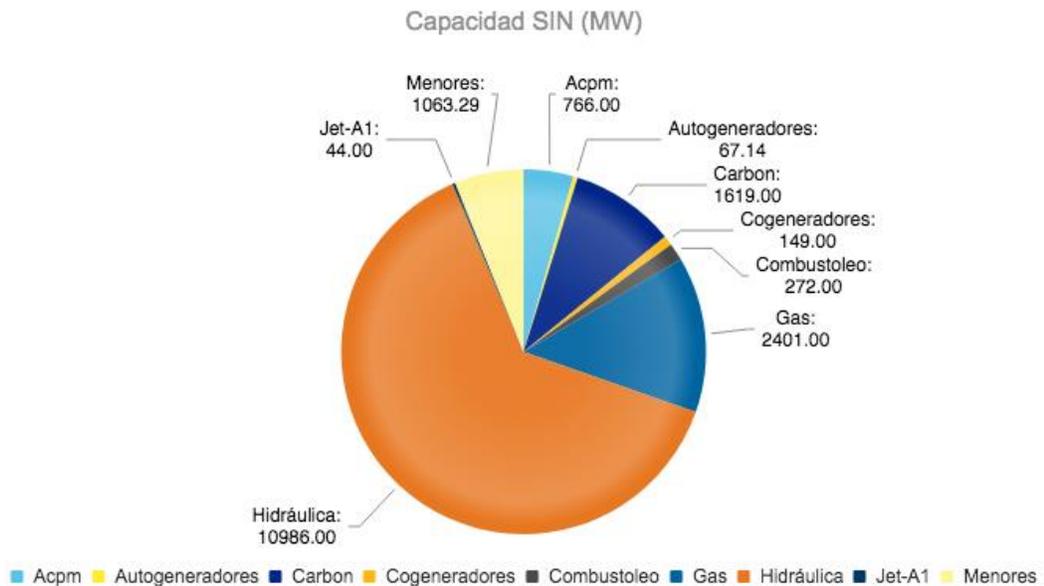
Por otro lado, la electrificación acompañada de un mix de generación renovable tiene otros beneficios como son una mayor eficiencia energética, reducción de la contaminación en el ámbito local, reducción de la dependencia energética y mejora de la balanza comercial, que redundan directamente en los ciudadanos y en la economía.

1.3. Contexto Nacional

Colombia se posiciona como uno de los países con mayor riqueza hídrica tanto a nivel global como en Latinoamérica. Debido a esto, la matriz de generación de energía eléctrica del país está basada aproximadamente en un 63% en el recurso hídrico, lo que la convierte en una matriz limpia, compuesta por recursos renovables como lo es el agua, y menos contaminante que el común de matrices energéticas a nivel mundial, al no tener una alta dependencia en condiciones normales de recursos fósiles, los cuales contribuyen con la emisión de CO₂ a la atmósfera.

La Ilustración 1 presenta el total de potencia neta que pueden suministrar los recursos de generación registrados del SIN, clasificadas en hidráulica, térmica por combustible, menores, cogeneradores y autogeneradores.

Ilustración 1 Capacidad del SIN



Fuente: (XM S.A E.S.P, 2019a)

Pero al considerar que la disponibilidad del recurso hídrico depende de eventos climatológicos como el fenómeno de El Niño y el fenómeno de La Niña, Colombia ha definido unas políticas energéticas que buscan velar de forma permanente el abastecimiento de la demanda de energía y que posibilitan la generación utilizando recursos fósiles como carbón, gas natural, gas licuado de petróleo, entre otros, que ante eventos de disminución de lluvias ayudan a soportar la menor generación de las grandes hidroeléctricas debido a su bajo nivel de embalse.

En el año 2016, el país atravesó por una crisis energética producto del fenómeno del niño, combinado con la ocurrencia de eventos operativos inesperados que ocasionaron la salida de generación hidráulica y térmica en el período donde se requería máxima disponibilidad del parque generador. Este evento trajo consigo que los aportes al Sistema Interconectado Nacional estuvieran un 43% por debajo de los aportes históricos para el período de mayor déficit, septiembre de 2015 a marzo de 2016 (XM S.A E.S.P, 2016). Estos hechos estresaron la operación del sistema, al punto en que el operador debió adelantar acciones para mitigar los probables riesgos de desatención de la demanda, y garantizar una operación segura, confiable y económica a través del desarrollo de campañas de uso eficiente de energía, la gestión con auto generadores para que inyectaran al sistema, la gestión en logística de gas y líquidos y la preparación del parque térmico para generar valores cercanos a la OEF (XM S.A E.S.P, 2016).

De este acontecimiento se logra destacar la importancia de contar con una canasta energética diversificada, integrando otras fuentes y tecnologías renovables, como es el caso de la energía eólica, solar, generación geotérmica y la cogeneración moderna a partir de biomasa, con el fin de reducir la dependencia en las fuentes convencionales tanto hidroeléctricas a gran escala como fósiles.

Así mismo, La Tabla 1, muestra la información de la generación para los años 2017 y 2018 desagregada por el tipo de fuente de energía usada y su participación respecto a la generación total. Se destaca para el 2018 un leve decrecimiento de la generación con fuentes renovables con un -1% respecto al año 2017, disminución explicada por el decrecimiento en el 1.2% de la generación hidráulica, que es la de mayor participación en la energía renovable. Disminución explicada por atentados que afectaron dos circuitos de transmisión que unen la región caribe con el SIN. Las líneas de transmisión Porce – Cerromatoso 500 kV y Copey – Ocaña 500 kV, limitaron la transferencia de energía del centro al norte del país, lo que llevo a suplir esta energía con generación térmica en la región caribe. Este hecho también se evidencia en la Tabla 1, al ver un aumento en la generación con no renovables frente al año 2017 de 32,6 % (XM S.A E.S.P, 2018).

Tabla 1 Fuentes de Energía Colombia

Fuente de Energía	2017 GWh	Participación (%)	2018 GWh	Participación (%)	Variación 2018 vs. 2017
Fuentes de energía No Renovable					
Combustible fósil	8682,9	13,0	11510,7	16,7	32,6%
Total No Renovable	8682,9	13,0	11510,7	16,7	32,6%
Fuentes de energía Renovable					
Biomasa	632,8	0,9	729,8	1,06	15,3%
Eólica	3,1	0,0	43,4	0,06	1300,0%
Hidráulica	57343	86,0	56647	82,17	-1,2%
Solar	5,4	0,0	12	0,02	122,2%
Total Renovable	57984,300	87,0	57432,2	83,30	-1,0%
Total general	66667,200	100,0	68942,9	100,00	3,4%

Fuente: (XM S.A E.S.P, 2018)

Por otro lado, durante los últimos años se ha presentado un crecimiento alrededor del 3% en la demanda de energía eléctrica anual, tendencia que se mantiene en las proyecciones de largo plazo realizadas por la UPME. La Tabla 2, muestra el crecimiento de la demanda proyectada de energía eléctrica hasta el año 2033, considerando las expectativas de dinámica del sector industrial, la electrificación de la economía y la interconexión con Panamá prevista para el año 2024 (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2019).

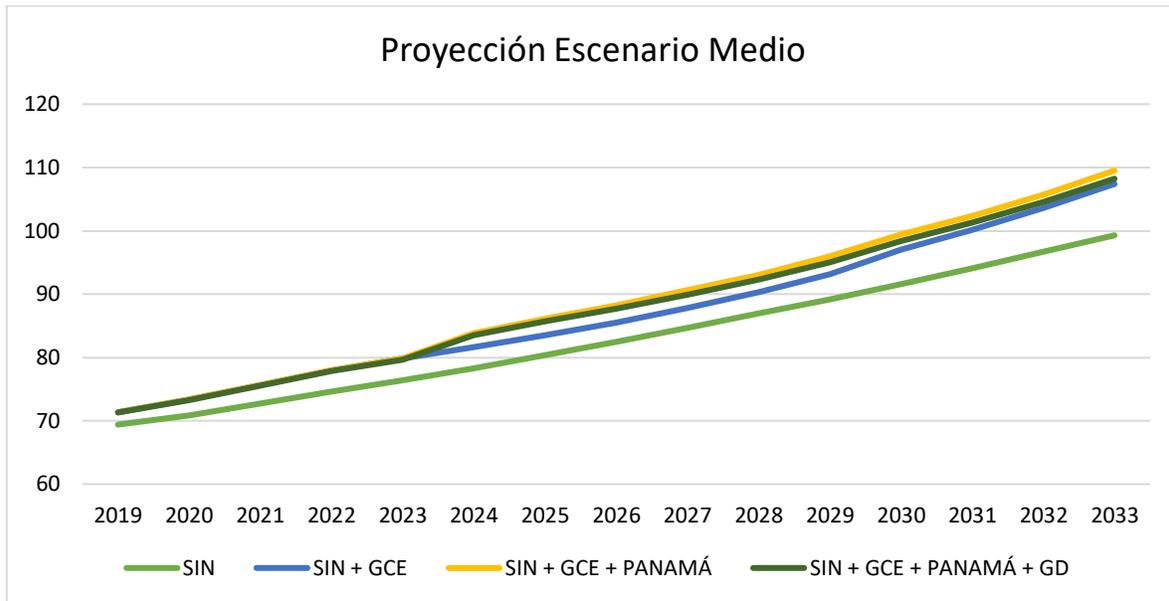
Tabla 2 Crecimiento de la Demanda Energía Eléctrica (%)

Crecimiento de la Demanda Energía Eléctrica (%)				
AÑO	SIN	SIN + GCE	SIN + GCE + PANAMÁ	SIN + GCE + PANAMÁ + GD
2019	2,2	3,2	3,2	3,2
2020	2,1	2,8	2,8	2,8
2021	2,6	3,2	3,2	3,2
2022	2,6	3	3	2,9
2023	2,4	2,5	2,5	2,4
2024	2,5	2,2	4,9	4,8
2025	2,7	2,3	2,7	2,6
2026	2,6	2,4	2,4	2,3
2027	2,7	2,7	2,7	2,6
2028	2,7	2,9	2,7	2,6
2029	2,6	3,1	3,1	3
2030	2,6	4,1	3,6	3,5
2031	2,8	3,3	3	3
2032	2,7	3,4	3,3	3,2
2033	2,7	3,6	3,6	3,5

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2019)

De acuerdo a los crecimientos de demanda mostrados en la Tabla 2 y la tendencia de crecimiento de la Ilustración 2, en donde, se evidencia la proyección de la demanda nacional de energía eléctrica en GWh, es posible afirmar que en el escenario medio presentado por la UPME al 2033 se requerirá para los próximos años continuar expandiendo la infraestructura energética del país, tanto la de generación como la de transporte.

Ilustración 2 Proyección de la Demanda Energía Eléctrica (GWh)



Fuente: Elaboración propia, a partir de (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2019)

Esta expansión se planifica con años de anticipación y por tanto, se han diseñado y desarrollado diversos proyectos, dentro de los cuales se encuentra el Proyecto Hidroeléctrico Ituango, el cual debía entrar en operación en diciembre de 2018 con 300 MW, correspondientes a la capacidad de generación de una de las ocho turbinas del proyecto, que en total suman una capacidad instalada de 2.400 MW, lo que representa cerca del 14% de la capacidad total instalada actual del país que alcanza los 17.200 MW, cifras que demuestran la importancia de esta obra para el sector eléctrico (BANCOLOMBIA, n.d.).

Teniendo en cuenta la situación del proyecto hidroeléctrico más grande del país, el panorama para el sector eléctrico cambia ante el retraso en su entrada en operación, que se estima sea en unos 2 o 3 años. Con la actual capacidad instalada del país podría suplirse la demanda hasta 2021 bajo condiciones críticas de hidrología. Pero ante un mayor retraso en la entrada en operación de Hidro Ituango, podría haber insuficiencia en la oferta para cubrir las necesidades de energía (BANCOLOMBIA, n.d.).

En concordancia con esto, el Ministerio de Minas y Energía, con el propósito de garantizar el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético, promoviendo la gestión eficiente de la energía y comprendiendo tanto la eficiencia energética como la respuesta a la demanda, crea la Ley 1715 de 2014 que mejora la metodología de construcción de escenarios, minimizando conjuntamente los costos de operación e inversión en términos de abastecimiento energético, a partir de la inclusión de nuevas fuentes de energía renovable (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME),

2015). Esta ley, establece beneficios tributarios para el desarrollo de las FERNC, impactando de manera positiva el retorno financiero de estos proyectos.

Así mismo, se expidió el decreto 0570 de 2018 que establece subastas de largo plazo para las energías renovables. Este decreto incentiva y facilita la inversión en proyectos de FERNC, debido a que garantiza un flujo de caja constante de largo plazo (Ministerio de Minas y Energía, 2018).

Dichas subastas de contratos de energía de largo plazo en Colombia se empezaron a ejecutar en el 2019, la última se dio a finales de octubre y contó con la participación de 20 generadores y 23 comercializadores calificados, pasando de menos de 50 MW a más de 2,200 MW de capacidad instalada para el año 2022, lo que lleva a superar la meta de incorporación de fuentes no convencionales de energías renovables y a catalogarse como un hito energético para el país (Dinero, 2019).

Todo esto es posible si se tienen en cuenta los proyectos que actualmente están registrados ante la UPME, los cuales evidencian un amplio potencial de energía solar y eólica en el país, principalmente en los departamentos de La Guajira y Cesar. En total, son 392 proyectos de energía solar que suman 5,339 MW, 19 proyectos de energía eólica que generarían 2,747 MW y 14 proyectos de biomasa para generar 59 MW. Cifras que muestran un panorama alentador frente a la coyuntura que se está viviendo en el sector eléctrico en Colombia (BANCOLOMBIA, n.d.).

El plan de expansión de referencia generación – transmisión 2017-2031 de la UPME (Arce Zapata et al., 2018) presenta los posibles proyectos a implementar conforme al análisis económico y operativo de la inclusión de fuentes de generación a partir de la biomasa, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs), plantas eólicas y plantas solares en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), entre otros aportes (Arce Zapata et al., 2018).

En cuanto al desarrollo de proyectos eólicos en áreas de alto potencial como La Guajira, las razones que llevan a considerarlos son: el valor asociado al uso del recurso eólico, que hoy en día es menospreciado, y está en capacidad de reducir la necesidad de despachar plantas de generación de alto costo, como las térmicas, costos que además de ser elevados, están sujetos a la volatilidad del mercado internacional. Así como también se considera la reducción de los costos asociados al problema de restricciones del sistema eléctrico al aumentar la capacidad de generación en la región caribe. Igualmente, el desplazamiento de generación térmica con fuentes fósiles por eólica renovable representaría un beneficio ambiental medido en términos de emisiones de efecto invernadero. En cuanto a la energía solar, se consideran que los costos de producción y los precios de la tecnología solar fotovoltaica han disminuido considerablemente en los últimos años, y teniendo en cuenta que el país cuenta con buen recurso promedio disponible, en buena parte de la Costa Atlántica, Arauca, Casanare, Vichada y Meta, con valores de irradiación que superan el promedio mundial, comparables con algunas de las regiones con mejor recurso en el mundo (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2015).

La evolución de las FERNC impulsa un mercado con gran perspectiva a futuro, que ha originado una democratización de la generación de energía en Colombia, un escenario donde la demanda ya no representa un usuario pasivo sino un agente de cambio que, a través de autoridades locales, desarrolladores comunitarios o privados, entre otros, ejerce responsabilidades de planeamiento y desarrollo de infraestructura que traen consigo retos de accesibilidad a las redes de distribución y transmisión (Gutierrez & Lopez, n.d.).

La ausencia de un reglamento técnico y operativo que guíe y dé certeza a los agentes desarrolladores sobre los requerimientos específicos a ser cumplidos desde el diseño mismo de sus proyectos para poder ser interconectados al SIN, representa una barrera que debe ser superada mediante la adopción o producción de reglamentos específicos en tal sentido. Entre tanto, la inexistencia de redes de transmisión cercanas a las áreas con mayor potencial del recurso eólico (Alta Guajira), para interconectar estos proyectos al SIN de una manera económicamente viable para el inversionista representa una barrera crucial para el desarrollo de este nicho de oportunidad.

Así mismo, las FERNC imponen un nuevo nivel de incertidumbre sobre la operación del SIN que incluye nuevos paradigmas de control, nuevos flujos de información, y la necesidad de nuevas herramientas para asistir la toma de decisiones en tiempo real. Se espera que las tareas llevadas a cabo durante la operación, como son: supervisar el funcionamiento de la red, ejecutar maniobras, realizar control de tensión y atender perturbaciones en el sistema de potencia, se vean afectadas con la entrada de las FERNC. Evidenciando una introducción de dinámicas lentas y rápidas en la producción de potencia derivadas de la dependencia de las FERNC a condiciones climatológicas cambiantes en el corto plazo. Esta variabilidad puede ocasionar variaciones en los flujos de potencia por los circuitos del sistema y por las transferencias internacionales de electricidad. Lo que podría implicar un mayor esfuerzo operativo para los transmisores nacionales de controlar intercambios, cortes, y sobrecargas de equipos.

En definitiva, el sector eléctrico está llamado a ser un actor clave en la transición energética, lo que va a suponer una serie de retos que vendrán motivados principalmente por dos factores: la mencionada descarbonización de la generación de electricidad y las nuevas formas de consumo que una sociedad más electrificada va a demandar. Por otro lado, estos retos se tendrán que gestionar en un entorno tecnológico en rápida evolución que abrirá nuevas opciones a los agentes y que conducirá a la transformación digital del sector eléctrico (Red Eléctrica de España (REE), 2019a).

En este contexto, la continuidad y éxito de la evolución de la industria energética recae actualmente sobre transmisores nacionales y operadores de red, en su capacidad de flexibilizarse, enfrentar barreras y adaptarse a la incorporación de las FERNC en el SIN, y en la medida en que su objeto primordial sea contribuir y promover dicha evolución (Shaw, Mike, & Tim, 2010).

Se requiere entonces reunir los elementos suficientes que permitan tener mayor certidumbre sobre el impacto que este tipo de tecnología puede tener en la operación y expansión de los sistemas de transmisión de energía eléctrica en Colombia, para así evidenciar los retos que las empresas transmisoras deben empezar a incorporar en su estrategia, en donde, frente a las nuevas tendencias

del sector, es posible que se enfrenten a características diferentes de mercado, las cuales podrían afectar las variables de ingreso, sostenibilidad y crecimiento de los negocios actuales y futuros.

1.4. Conclusiones

La inminente entrada de las FERNC al sistema eléctrico colombiano impone retos para lograr su correcta inclusión, retos de carácter normativos, formativos y operativos para los agentes del sector eléctrico. Dicha penetración vendrá de la mano con impactos para el SIN, los cuales deberán ser enfrentados por los participantes del sector eléctrico, para facilitar y maximizar la integración de las fuentes renovables y al mismo tiempo reforzar su seguridad.

2. Marco Teórico

2.1 Introducción del capítulo

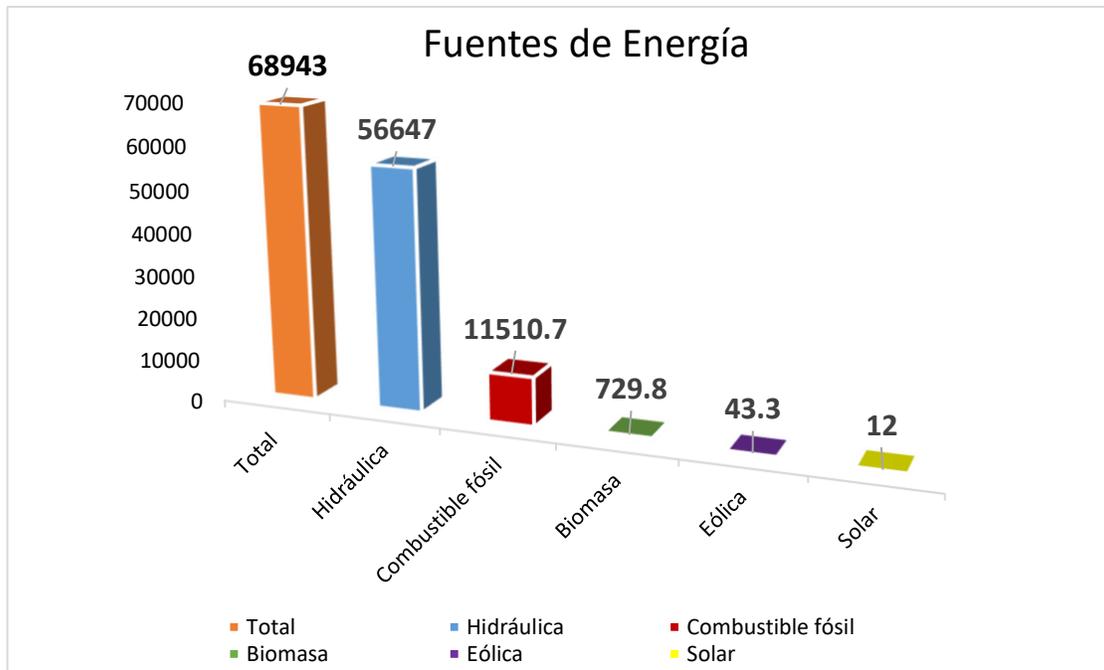
Es necesario comprender el funcionamiento del sector energético, su estructura y las diferentes instituciones que lo conforman, para poder comprender las necesidades de transformación que se requieren para dar cara a los desafíos, que van de la mano del crecimiento económico del país, fomentando el aumento de capacidades de generación, transmisión y distribución para asegurar la disponibilidad de energía, es decir, la seguridad energética. Que va de la mano con el aumento de las energías renovables en la matriz energética del país, siendo un pilar fundamental para la competitividad y la productividad del sector.

2.2 Generación del SIN

En Colombia, la generación de energía eléctrica para abastecer la demanda del SIN a 2018 se situó en 68,943 GWh, en la .

Ilustración 3 se evidencia como está basada en gran medida por el recurso hídrico. De esta manera, si se analiza la generación por tipo de recurso natural, se evidencia que la generación en el año 2018 se realizó con un porcentaje de participación del 83% de recursos renovables, y el 17% restante con recursos no renovables. (XM S.A E.S.P, 2018).

Ilustración 3 Generación del SIN

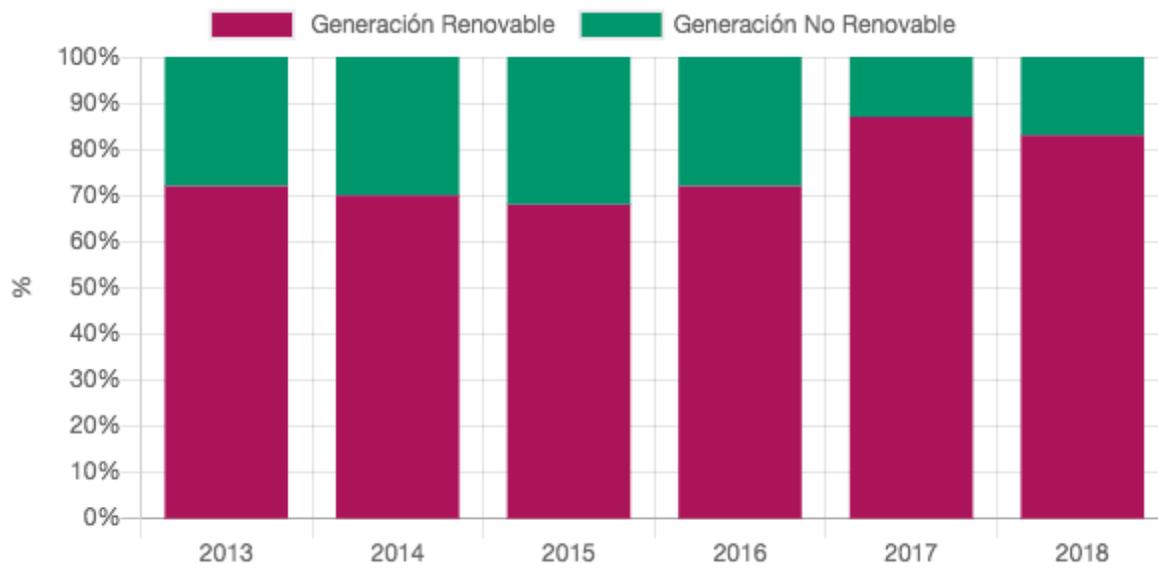


Fuente: Elaboración propia, a partir de (XM S.A E.S.P, 2018)

La generación renovable en Colombia incluye generación hidráulica, eólica, solar, fotovoltaica y biomasa, mientras que la no renovable incluye generación con combustibles fósiles, entre los cuales está el carbón, gas, combustóleo, ACPM y mezcla de combustibles fósiles.

La Ilustración 4, muestra la evolución de la generación en Colombia durante los últimos 6 años, en donde se evidencia que la participación de la energía no renovable estuvo cerca al 30% entre 2013 y 2016 coincidiendo con los bajos aportes que se registraron en Colombia entre el año 2012 y 2016, período que contiene el evento *El Niño 2014 -2016*, y que ha sido hasta ahora el evento de mayor duración desde 1950. Así mismo, se evidencia que la participación de las fuentes renovables aumentó en los años 2017 y 2018, pasando a aportar más del 80% de la generación registrada en el SIN.

Ilustración 4 Evolución de la generación en Colombia



Fuente:(XM S.A E.S.P, 2018)

2.3 Fuentes de energía renovables no convencionales - FERNC

La ley 1715 de 2014, define como fuentes no convencionales de energía renovable, aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente, tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares.

Las fuentes eólicas, solar y pequeños aprovechamientos hidráulicos tienen una característica particular, la variabilidad de su generación. Dicha variabilidad es un reflejo del comportamiento de su fuente primaria, como la irradiación y el viento, que dependen de los fenómenos climáticos, meteorológicos e hidrológicos del momento.

Adicionalmente estas fuentes se pueden dividir en dos grandes grupos: las fuentes de generación síncrona y las no síncrona. Entre las fuentes síncronas se encuentran los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, para las cuales la velocidad de rotación de sus generadores depende de la frecuencia del sistema de potencia. Entre las fuentes no síncronas se encuentran las fuentes eólicas y solares, cuya generación no responde de manera natural a la respuesta de frecuencia del sistema y es controlada mediante inversores.

Actualmente, el sistema eléctrico colombiano cuenta con 16.8 GW de generación instalada al SIN, de los cuales 1.4 GW son pequeñas centrales hidráulicas y filo de agua, 0.02 GW eólicos y 0.01 GW solares. No obstante, considerando los proyectos de generación renovables no convencionales con concepto de conexión de la UPME, se espera que para el año 2023 el sistema eléctrico colombiano

presente cambios importantes en su matriz energética, contando con más de 3 GW de estas fuentes (XM S.A E.S.P, 2019e).

2.4 Sector Eléctrico en Colombia

El sector eléctrico colombiano está conformado por distintas entidades y empresas que cumplen diversas funciones en los mercados de generación, transmisión, comercialización y distribución de energía.

El sector se fundamenta en el hecho de que las empresas comercializadoras y los grandes consumidores adquieren la energía y potencia en un mercado de grandes bloques de energía, el cual opera libremente de acuerdo con las condiciones de oferta y demanda.

Para promover la competencia entre generadores, se permite la participación de agentes económicos, públicos y privados, los cuales deberán estar integrados al sistema interconectado para participar en el mercado de energía mayorista.

Con el fin de que el sector funcione y se desarrolle de la mejor manera, se estableció el esquema mostrado en la Ilustración 5 que involucra a diferentes entidades como la UPME, quién está encargada de diseñar la política del sector, la CREG quién se encarga de reglamentar, a través de normas jurídicas, el comportamiento de los usuarios y las empresas, el mercado que está compuesto por los usuarios que se clasifican en regulados y no regulados, los agentes, y finalmente la SSPD encargada de vigilar el comportamiento de los agentes y sancionar las violaciones a las leyes y reglas (Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), 2019b).

Ilustración 5 Estructura Institucional del Sector Eléctrico



Fuente: (Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), 2019b)

Así mismo, hace parte del sector la empresa XM encargada de coordinar la operación del sistema interconectado nacional y administrar el mercado de energía mayorista de Colombia, como se ve en la Ilustración 6. A través del CND quien es el encargado de planear, supervisar y controlar la operación integrada de los recursos de generación, interconexión y transmisión del SIN garantizando una operación segura, confiable y económica. El ASIC quien es el responsable del registro de fronteras comerciales y liquidación de los contratos de largo plazo, de las transacciones en la bolsa y de mantener el sistema de información del MEM. Y finalmente el LAC quien es el encargado de facturar, cobrar y distribuir los cargos por uso de las redes del SIN (XM S.A E.S.P, 2019d).

Ilustración 6 Estructura XM



Fuente: (XM S.A E.S.P, 2019b)

2.5 Transmisión

El transportador de energía eléctrica es fundamental para el funcionamiento del mercado de energía; es el enlace entre la generación y la demanda, y el medio a través del cual se realizan los intercambios de energía eléctrica.

El transporte de energía, por su condición de monopolio natural, es una actividad regulada dentro de la cadena productiva del sector eléctrico, cuya expansión se adjudica a la inversión privada a través de procesos licitatorios derivados de la disposición política de los gobiernos. Los ingresos asociados a la prestación del servicio de transporte de energía son regulados y están indexados a variables macroeconómicas como la tasa de cambio Peso – Dólar, al Índice de Precios al Productor (IPP) y al Índice de Precios al Consumidor (IPC) (ISA S.A E.S.P, 2019).

En Colombia se dedican a esta actividad 8 empresas, en donde, INTERCOLOMBIA es el mayor transportador de energía eléctrica, con presencia en 356 municipios del país, con 94 subestaciones y una infraestructura de aproximadamente 10,870 km de circuitos en operación (INTERCOLOMBIA S.A. E.S.P, 2019).

El sistema interconectado de transmisión de energía eléctrica de Colombia está compuesto por 15.601,63 km de circuitos que operan a tensiones superiores a 220 kV, según la Tabla 3, el porcentaje más alto de participación en el negocio de transporte de energía eléctrica en Colombia

lo tiene INTERCOLOMBIA con el 69,68%, seguido por el Grupo Energía de Bogotá en un 10,49% y Transelca en un 10,48%.

Tabla 3 Total Líneas de Transmisión STN

	Longitud (km)	Longitud (%)
TOTAL LÍNEAS DE TRANSMISIÓN STN	15.601,63	
TRANSMISIÓN 220 kV	2.675,23	100,00
EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLÍN S.A. E.S.P.	842,95	31,51
GRUPO ENERGÍA BOGOTÁ SA E.S.P.	20,00	0,75
INTERCOLOMBIA S.A. E.S.P.	177,64	6,64
TRANSELCA S.A. E.S.P.	1.634,64	61,1
TRANSMISIÓN 230 kV	10.391,01	100,00
CENTRALES ELÉCTRICAS DEL NORTE DE SANTANDER S.A. E.S.P.	9,20	0,09
DISTASA S.A. E.S.P.	18,75	0,18
ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. E.S.P.	120,41	1,16
EMPRESA DE ENERGÍA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.	272,33	2,62
EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLÍN S.A. E.S.P.	149,12	1,44
GRUPO ENERGÍA BOGOTÁ SA E.S.P.	1.617,32	15,56
INTERCOLOMBIA S.A. E.S.P.	8.203,88	78,95
TRANSMISIÓN 500 kV	2.535,39	100,00
EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLÍN S.A. E.S.P.	45,90	1,81
INTERCOLOMBIA S.A. E.S.P.	2.489,49	98,19

Fuente: Elaboración propia, a partir de (XM S.A E.S.P, 2019c)

2.6 Conclusiones

La inclusión de las FERNC en el sistema eléctrico colombiano impone retos, cambios y desafíos que impactan directamente a todas las empresas que hacen parte de la prestación del servicio eléctrico, es importante conocer a las instituciones y los roles que ejercen dentro del sector, para comprender las exigencias en materia institucional y de estrategia para facilitar la transición requerida por las FERNC.

3. Revisión de Literatura

3.1 Introducción del capítulo

Las energías renovables no convencionales se han presentado como una opción sostenible y técnicamente viable para producir grandes porcentajes de energía eléctrica en varios países. El importante y acelerado desarrollo tecnológico ha permitido reducir sus costos y ha favorecido su expansión a una escala impensable, además de contar con perspectivas de crecimiento muy favorables.

En este contexto, es necesario avanzar hacia un mejor conocimiento de los efectos vinculados al crecimiento de las energías renovables, y de esta manera tener mayor certidumbre del impacto que ha ocasionado este tipo de tecnología sobre la operación y expansión de los sistemas de transmisión de energía eléctrica en el mundo, y la manera en la que lo han enfrentado diferentes empresas y países.

3.2 Marcos de las Energías Renovables

3.2.1 Red Eléctrica de España (REE)

Red Eléctrica de España (REE), como transportista único y operador del sistema (TSO) en España y teniendo en cuenta su función de asegurar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y garantizar en todo momento la continuidad y seguridad del suministro eléctrico, la convierte en un agente clave para asegurar el éxito de las políticas de transición energética, garantizando que los cambios en el sistema se presenten sin poner en riesgo la seguridad y continuidad del suministro (Red Eléctrica de España (REE), 2019a).

REE presentó un plan estratégico de 2018-2022, para que la transición energética sea una realidad, este plan está orientado a la consecución de los retos que será necesario abordar para facilitar la transición y hacerla una realidad. Entre los retos, se destacan: la inversión en red de transporte en España, con un fuerte componente tecnológico, debido a que se requiere el desarrollo y mantenimiento de una red robusta, flexible y fiable que permita conectar la nueva generación renovable y transportar su producción desde donde el recurso está disponible en cada momento hasta el cliente final, minimizando las restricciones técnicas que pueden llevar a la pérdida de parte de la energía en forma de vertidos y a sobrecostos para el sistema (Red Eléctrica de España (REE), 2019b).

Por otro lado, evidencian la necesidad de dotar a la red de tecnología que permita la plena coordinación entre los diferentes agentes del sistema. Esto significa que las redes integren flujos bidireccionales de millones de puntos de conexión; gestionen una intermitencia renovable muy superior a la actual, y esté dotada de una infraestructura digital y de telecomunicaciones que

permita una mayor monitorización, observabilidad, sensorización, control y automatización de la red (Red Eléctrica de España (REE), 2019a).

Así mismo, con el fin de incrementar la capacidad de transporte en aquellos emplazamientos donde es necesario, pero no es posible por problemas socio culturales o restricciones físicas, se deben incorporar nuevas tecnologías disponibles, como el caso de baterías con funcionalidades similares a las que proveería la propia red. Se prevé esta posibilidad, habilitando tanto a los operadores de redes de transporte como de distribución para poseer este tipo de activos siempre y cuando la autoridad reguladora dé su aprobación.

Finalmente, el despliegue de las interconexiones es un elemento esencial para integrar los volúmenes de renovables propuestos en el ámbito nacional de forma segura y eficiente, y profundizar en el desarrollo del mercado interior de la energía en la Unión Europea. Teniendo en cuenta que las interconexiones no solo mejoran la eficiencia de los sistemas al contribuir a una asignación más eficiente de las instalaciones de generación, reduciendo la necesidad de instalaciones duplicadas a un lado y al otro de las fronteras, sino que son esenciales para la seguridad de suministro, sobre todo en un escenario de alta penetración de generación eléctrica procedente de fuentes renovables no gestionables.

3.2.2 ACCIONA

Por su parte, ACCIONA una empresa líder a nivel mundial en el ámbito de las energías renovables, también ha reconocido que la transición energética mundial está en marcha, impulsada por las ambiciones de mejorar la seguridad energética, abordar los impactos ambientales y lograr el acceso universal a la energía. La transición implica un replanteamiento fundamental de la forma en la que se produce, transporta y consume energía, lo que trae cambios en la operación del sistema eléctrico y beneficios económicos para el sector y los consumidores (Markets, 2018).

Así mismo, el aumento del consumo de la energía tiene lugar en medio de otras tantas tendencias importantes que también están dando forma al futuro del sector eléctrico, como lo son el aumento de la interacción entre el sector eléctrico y los adyacentes, como el gas, y la tecnología de la información y la comunicación; reducción de costos y la mejora tecnológica en tecnologías prometedoras, especialmente el almacenamiento de electricidad; la creciente presencia de recursos energéticos distribuidos (DER), que incluyen la generación distribuida y respuesta a la demanda, entre otros.

ACCIONA identifica que debe adaptar sus prácticas de planificación y operación en consecuencia con los retos de la transformación energética, así como desempeñar nuevos roles como facilitadores del mercado y operadores de sistemas con recursos no convencionales. De esta manera, los sistemas de energía deben gestionarse en su conjunto para garantizar la seguridad del suministro tanto a corto como a largo plazo. La planificación y operación del sistema de energía comprenden una cadena de decisiones secuenciales, que van desde la expansión de la capacidad de generación y la planificación de la red de transmisión a largo plazo hasta decisiones a corto plazo, como el envío

de unidades de generación y la utilización de reservas. Además de las limitaciones técnicas, estas decisiones deben guiarse por consideraciones económicas para que se maximice el bienestar social. (Markets, 2019).

Por otro lado, una gran penetración de FERNC impone la necesidad de adaptar el diseño de los mercados de energía. Si bien el impacto que tienen altas proporciones de estas fuentes en la operación de los sistemas eléctricos puede afectar tanto la operación a corto plazo como la planificación a largo plazo en contextos liberalizados.

Las tecnologías de las FERNC, en particular la eólica y la solar, presentan desafíos para su integración en el sistema eléctrico de potencia ocasionados por la variabilidad y limitada previsibilidad de los recursos. Estas características hacen que la energía solar y eólica sean recursos completamente diferentes cuando se trata de la integración en el mercado y por tanto deben ser estudiados e investigados.

Así mismo, se analiza la posible dispersión geográfica, en casos en donde los recursos renovables están distantes de los centros de demanda, y en este caso, se genera la necesidad de nuevas inversiones en redes de transmisión y/o refuerzos de la red actual. Lo que se deriva en señales de inversión que impactan a los negocios de los diferentes agentes del sector, limitando o encareciendo la inclusión de las FERNC en el sistema eléctrico de potencia (Markets, 2019).

Finalmente, ACCIONA concluye que, para el desarrollo sostenible y un mayor despliegue de las energías renovables, es necesario adaptar el diseño del mercado para abordar los impactos a nivel del sistema y los impactos a nivel del mercado que incluyen efectos en los ingresos de las compañías del sector. De hecho, abrazar y apoyar la transición energética trae una amplia gama de beneficios para toda la economía, además de impactos positivos en el medio ambiente y la seguridad energética (Markets, 2019).

3.2.3 XM

XM como empresa especializada en la gestión de sistemas de tiempo real y debido a su rol de operador del sistema interconectado nacional de Colombia, ha adelantado estudios, consultorías especializadas, capacitaciones, entrenamientos y proyectos de investigación, entre otros, que permitan tener mayor certidumbre sobre el impacto de la entrada de las FERNC al sistema eléctrico colombiano. Esto con el objeto de promover el desarrollo sostenible y la utilización de las FERNC, como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético, promoviendo también la eficiencia energética y la respuesta de la demanda.

XM consciente de la responsabilidad con el desarrollo del país y teniendo en cuenta los retos operativos que generan fuentes variables, estructuró un mapa de ruta para la integración de las FERNC a los procesos del centro nacional de despacho. En el cuál cobra importancia revisar los impactos de la integración de FERNC en el SIN para establecer los requerimientos técnicos

necesarios para la integración al SIN, y así evitar barreras de entrada para dichas fuentes (XM S.A E.S.P, n.d.-a).

Dentro de las características técnicas de las FERNC que imponen desafíos operativos, se identificaron el manejo de la variabilidad, manejo de la incertidumbre, conexión de generación no síncrona y alta concentración en puntos específicos de la red. Lo que lleva a estudiar los criterios de calidad, seguridad y confiabilidad, evidenciando que, dependiendo del nivel de penetración, la variabilidad de FERNC (dinámicas lentas y rápidas) puede ocasionar variaciones en el intercambio programado con Ecuador y en los flujos de potencia por el resto de los circuitos del sistema, como consecuencia de esto, se podría requerir un mayor esfuerzo operativo para controlar intercambios, cortes, y sobrecargas de equipos. Así mismo, los desbalances del sistema producto de las dinámicas lentas y rápidas de las FERNC y los errores de pronóstico, tienden a incrementar las acciones de control necesarias para mantener el balance carga generación durante el día. Lo que lleva a evaluar si realmente las instrucciones telefónicas resultan viables para la operación de un sistema con penetración de FERNC (XM S.A E.S.P, 2017a).

Dichos desafíos operativos llevan a pensar en estudios y requisitos de conexión para las FERNC, que exijan su aporte rápido de reactivos, soportabilidad de huecos de tensión, curva de carga, respuesta en frecuencia, rampas de entrada y salida, control primario y secundario de frecuencia de los generadores de FERNC, curva de cargabilidad, rangos de operación en frecuencia, pruebas de equipos, reserva rodante y de AGC. Todo esto con el propósito de definir los requerimientos mínimos de conexión de las fuentes no síncronas según el estado del arte y las necesidades actuales y futuras del sistema, que permitan una operación flexible y la integración eficiente y sostenible de estos recursos, y así mantener los criterios de confiabilidad, seguridad y economía exigidos por la ley para la planeación y la operación del sistema (XM S.A E.S.P, 2017b).

Finalmente, XM se prepara como operador del SIN para lograr la correcta integración de estos nuevos recursos, a través de una propuesta regulatoria que propone mejoras en la información reportada, nuevos requisitos mínimos técnicos, pronósticos más ajustados al tiempo real, cambios al despacho y reservas, incorporación de nuevos dispositivos de almacenamiento, nuevos mercados de tiempo real y de balances, y nuevos productos de servicios complementarios (XM S.A E.S.P, n.d.-b).

3.3 Conclusiones

La entrada de las FERNC en las políticas de gobierno, los mercados eléctricos y los sistemas eléctricos de potencia proveen cierta incertidumbre que ha llevado a que las empresas y los gobiernos se interesen en conocer los impactos que la entrada de estas fuentes ocasiona sobre sus negocios actuales.

Alrededor del mundo se han evaluado tanto los impactos operativos que afectan el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia, como los estratégicos que le apuntan al desempeño de las compañías y el desarrollo del país.

Las empresas y agentes del sector eléctrico se preparan para tomar las mejores decisiones basados en lo estudiado e identificado, y de esta manera adaptar sus estrategias, procesos y negocios a los nuevos retos impuestos por las FERNC.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Proponer recomendaciones para afrontar los impactos que producirían la entrada de las fuentes de energía renovables no convencionales sobre el negocio de transmisión de energía eléctrica en Colombia.

4.2 Objetivos Específicos

- Identificar el impacto de la entrada de las fuentes de energía renovables no convencionales sobre el Sistema de Transmisión Nacional.
- Identificar el impacto de la entrada de las fuentes de energía renovables no convencionales sobre las empresas transmisoras de energía.

5. Impactos de las Energías Renovables No Convencionales

5.1 Introducción del capítulo

La incorporación de las fuentes de energía renovables no convencionales implica un reto de transformación del Sistema Interconectado Nacional, y como consecuencia en los roles de los agentes participantes del sector eléctrico. Estos últimos, estarán enfrentados a una transición que deberá evolucionar de manera adaptativa en concordancia con la flexibilidad que es cada vez más requerida en la red. Una operación más flexible de la red puede facilitar no solo la conexión de más fuentes renovables sino también una mejor utilización de la infraestructura existente. Debido a esto, es importante reunir los elementos suficientes que permitan tener mayor certidumbre sobre el impacto que este tipo de tecnología puede tener en los sistemas de transmisión de energía eléctrica en Colombia, para así evidenciar los retos que las empresas transmisoras deben empezar a incorporar en su estrategia.

5.2 Impactos sobre el Sistema de Transmisión Nacional

Dentro de los impactos identificados a nivel mundial ocasionados por la entrada de las FERNC en los sistemas de transporte de energía, se han evidenciado afectaciones en el perfil de voltaje, en la confiabilidad de los sistemas, en las pérdidas de la red, en la capacidad de las líneas de transmisión.

Además, se requieren cambios en la regulación y en las políticas internas de los países, sumado a unos costos de operación y de inversión necesarios para la inclusión de estas fuentes a la red. Finalmente, hay nuevas necesidades de planeamiento debido al aumento de la incertidumbre inherente derivado de estas fuentes. A continuación, se explican los impactos más relevantes.

5.2.1 Perfil de tensión

Se ha evaluado el impacto ocasionado por la integración de las FERNC sobre la red eléctrica, evidenciando un aumento en el perfil de tensión que afecta la estabilidad del sistema, esto se debe a que el voltaje es considerado como un índice importante por su efecto sobre la estabilidad y seguridad de los sistemas eléctricos de potencia. Variaciones en potencia activa (P) y reactiva (Q), también afecta los voltajes en todos los nodos del sistema y con esto, se pierde la capacidad de un sistema de potencia para mantener la tensión en condiciones iniciales y después de una perturbación (Bayindir et al., 2016).

Con estos hallazgos, se ha concluido que los sistemas de potencia actuales son incapaces de integrar todo el potencial de generación asociado a las FERNC debido a sobrecargas en los circuitos de transmisión, lo que ha llevado a evaluar restringir dicha generación para evitar refuerzos importantes en las regiones sobrecargadas, como lo son la ubicación de reguladores de tensión, reconductorización de los alimentadores existentes, ubicación de condensadores y reconfiguración

del sistema que ayudan a contrarrestar las caídas de tensión, debido a que implican altos costos de inversión y largos tiempos de construcción (Ahmed, Zafran, Khan, Waqar, & Hasan, 2018).

Por otro lado, se ha planteado que la localización y el dimensionamiento óptimo de las FERNC podría impactar de manera positiva los perfiles de tensión en los nodos con peor índice de confiabilidad y nivel de tensión, evitando así los refuerzos planteados (MARIANA LÓPEZ CEBALLOS, RAMÓN A. GALLEGO R., 2010).

5.2.2 Confiabilidad

La confiabilidad también ha sido tema de discusión y evaluación en varios países, en donde se ha evaluado que la electricidad a partir de las renovables requiere una importante capacidad de generación de respaldo debido a la incertidumbre ocasionada por las variaciones que tienen las fuentes de energía solar y eólica por su alta dependencia de las condiciones climáticas. Por tanto, se ha estudiado el impacto de la integración de tecnologías de almacenamiento en el sistema de potencia. Los resultados de los estudios indican que el almacenamiento de energía podría mejorar la confiabilidad y reducir los costos de electricidad, almacenando energía en horas de baja demanda y a precios bajos, para aprovechar la electricidad almacenada en horas pico donde es requerida (Assembayeva, Zhakiyev, & Akhmetbekov, 2017).

Así mismo, se ha evidenciado que los sistemas eléctricos en su mayoría son débiles para las necesidades actuales, y, por tanto, vulnerables a los impactos de la integración de las renovables; es decir, hay una alta probabilidad que la seguridad, estabilidad y confiabilidad del sistema sea perturbada. Varias investigaciones concluyen que en la actualidad los sistemas eléctricos de potencia son incapaces de integrar la generación renovable existente y la proyectada, sin emplear soluciones correctivas como la inclusión de un compensador estático de potencia reactiva SVC para fortalecer la estabilidad de los generadores y de esta manera, amortiguar las oscilaciones y mejorar la confiabilidad del sistema (Ahmed et al., 2018).

5.2.3 Pérdidas

Las pérdidas en los sistemas eléctricos de potencia se deben a la circulación de corriente a través de los conductores de permiten la transmisión de energía de un punto a otro de la red. Esto se da como consecuencia de la componente resistiva de las líneas de transmisión, la cual se encuentra en función de la distancia, lo que conlleva a evaluar los impactos de la ubicación de las FERNC en la red.

De esta manera, si las FERNC se ubican en puntos de la red cercanos a los centros de consumo, podrían ser consideradas como una alternativa para la disminución de pérdidas por transmisión. Lo que implicaría un ahorro para el consumidor de energía y mayor confiabilidad para la empresa transportista de energía (Sulakov, 2016).

Por otro lado, si se requiere transmitir gran cantidad de energía renovable a través de largas distancias, se debe considerar la transmisión a altos niveles de tensión para disminuir las pérdidas,

como lo son niveles iguales o superiores a 500 kV. Así como también implica analizar opciones como tecnología HVDC que ofrece valores de pérdidas muy inferiores a las de las líneas equivalentes de corriente alterna (Kashyap, Ahmad, El-Amin, Abdel-Galil, & Arif, 2018).

5.2.4 Capacidad de transferencia de potencia

Las líneas de transmisión permiten la transferencia de potencia desde un punto a otro de la red, cada línea está especificada con un límite máximo de potencia que permite su operación segura y confiable por un determinado periodo de tiempo. La capacidad de las líneas resulta ser un tema de interés debido a que la inclusión de las FERNC a la red impone nuevas necesidades de realizar obras de infraestructura, especialmente en transmisión que permitan transportar la nueva oferta energética para satisfacer las necesidades actuales.

Pero la construcción de nuevas líneas de transmisión resulta ser un proceso muy costoso y de trámite lento, lo que ha llevado a evaluar estrategias que permitan utilizar de forma más eficiente las instalaciones existentes, cumpliendo con las normas de seguridad pertinentes. Esto con el fin de transportar mayor potencia de un nodo a otro de la red.

Se ha visto que la capacidad de transferencia del sistema de transmisión existente puede mejorarse utilizando dispositivos de impedancia variable flexible AC (FACTS) (Wu, Lee, Hu, & Yang, 2017). Estos dispositivos son sistemas de transmisión de corriente alterna que incorporan controladores estáticos y otros basados en tecnología de electrónica de potencia para mejorar el control e incrementar la capacidad de transferencia de potencia. Así mismo, los FACTS re direccionan los flujos de potencia de tal manera que se optimiza el uso de la red de transmisión (Cueva, Siguencia, Ramón, & Cando, n.d.).

Así mismo se ha evidenciado que incluir un sistema de compensación serie en líneas largas, permite aumentar su capacidad de transferencia de potencia, y así maximizar la cantidad de energía transferida a través de ellas, debido al efecto de la reducción de la reactancia inductiva de la línea, reduciendo de este modo las caídas de tensión en la línea y aumentando el límite de estabilidad en estado estable (Kashyap et al., 2018).

5.2.5 Protecciones eléctricas

Las protecciones eléctricas son parte esencial de los sistemas de potencia debido a que garantizan la continuidad del servicio ante presencia de fallas, protegiendo personal, equipos e instalaciones.

Se han evidenciado afectaciones del comportamiento de los flujos de carga de la red al instalar FERNC, sobre todo cuando se encuentra operando en escenarios de demanda máxima y mínima, por lo que el ajuste y coordinación de protecciones es un tema con mucha relevancia para viabilizar la conexión de las FERNC en el SIN (XM S.A E.S.P, 2017b).

Además, se deben evaluar esquemas de protección selectiva que se coordinen con la red existente en estado estable y transitorio, que permita determinar ajustes y tipo de protección requeridas. Así como también se deben adaptar los puntos de conexión de las FERNC, para que puedan disponer de protecciones de sobre y baja tensión ajustados según requerimientos del sistema de potencia (Urbina, 2015).

5.2.6 Regulación

La regulación del mercado eléctrico colombiano fue diseñada con el objetivo de lograr que la energía eléctrica se preste al mayor número de personas y al menor costo posible para los usuarios, garantizando la calidad, cobertura y expansión, con una remuneración adecuada para las empresas del sector eléctrico.

En los informes de restricciones del SIN elaborados por el CND se observa que, para abastecer la demanda de energía eléctrica del país, garantizar los voltajes en rangos adecuados y mantener la frecuencia objetivo del SIN, se ha despachado generación de seguridad fuera de mérito a causa mantenimiento de activos en el SIN y la ausencia de proyectos de expansión que se encuentran retrasados. Esto se ha dado porque la mayoría de mantenimientos en los activos del STN y STR se ejecutan durante las horas del día, horas en las que el sistema presenta mayor demanda, así como también se evidencian retrasos en la duración real de ejecución de mantenimientos con respecto a la duración programada (Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), 2019a).

Estas restricciones han ocasionado un aumento del costo del servicio de energía para los colombianos que va en sentido contrario al objetivo de la regulación, y ha motivado el proyecto de resolución CREG 100 de 2019, cuyo propósito es disminuir las restricciones del sistema al trasladar estos costos a los agentes de transmisión y distribución que están relacionados con la causa que las origina (Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), 2019a).

La incorporación de las FERNC en el SIN puede aportar a la disminución de las restricciones actuales del sistema, debido a que su desarrollo está concebido en la región caribe colombiana donde está presente el recurso natural, región que se caracteriza por ser importadora de energía dado que la gran mayoría de recursos de generación se encuentran en el resto del país, además de contar con enlaces de transmisión limitados técnicamente que imponen restricciones para el sistema. De esta manera, la inclusión de las FERNC en dicha región podría evitar la gran dependencia energética del resto del país, y como consecuencia disminuir restricciones en el sistema, lo que a su vez podría derivar en el replanteamiento de resoluciones que impacten la remuneración de la actividad de transmisión, tal como lo plantea la CREG 100 de 2019.

5.2.7 Planeamiento

El planeamiento del sector eléctrico es fundamental para asegurar la continuidad del abastecimiento y el suministro de energía a menor costo, con menor riesgo y menores impactos

socioeconómicos y ambientales para la sociedad. La falta de un adecuado planeamiento puede llevar a un aumento de costos y/o disminución de la calidad del servicio. Las ineficiencias de la red del futuro, consecuencia de un mal proceso de planeamiento, asumirán la forma de racionamiento o energía no suministrada, excesos en capacidad instalada, mayores costos de transmisión y una programación de los recursos de generación ineficiente y costosa, entre otras.

El aumento constante de sistemas de electricidad basados en energía renovable ha impuesto nuevos desafíos para la planificación y la gestión de los sistemas eléctricos en transición. Estos desafíos se deben al cambio de la oferta de recursos de energía convencional a recursos de energía renovable influenciados por su naturaleza; pasar de la potencia firme convencional a la energía intermitente renovable; complejidades operacionales debido a rampas frecuentes y más empinadas; y la necesidad de igualar la demanda dinámica.

Cobra importancia planear óptimamente la red de transmisión para el escenario futuro con penetración de FERNC a gran escala, considerando que es un trabajo desafiante debido a la evolución del sistema, porque muchos factores pueden afectar la precisión del modelo, como la capacidad de almacenamiento de energía en el lado de la fuente, la dispersión y la diversidad de las energías renovables, la gestión del lado de la demanda, características de carga, los diferentes tipos de modos de crecimiento de energía y carga, y la madurez de la tecnología de generación de energía renovable (Zhang et al., 2017).

El planeamiento de la transmisión aporta a la determinación de refuerzos necesarios que se deben realizar en el sistema para que pueda cumplir con las condiciones impuestas por el crecimiento natural de la demanda y la nueva generación renovable y no renovable, evitar la congestión de la red, afrontar los desafíos técnicos impuestos por estas y no ocasionar costos innecesarios para las empresas transmisoras de energía.

5.3 Impactos sobre las Empresas Transmisoras

5.3.1 Inversiones futuras

El costo asociado a la inclusión de las FERNC en los sistemas eléctricos ha sido tema de discusión en muchas empresas dedicadas al negocio de transporte de energía eléctrica, ya que la consideración de integrarlas a sus negocios se ha visto afectada por todas las inversiones que se requieren.

Dada la posible dispersión geográfica, en casos en donde los recursos renovables están distantes de los centros de consumo, se genera la necesidad de nuevas inversiones en redes de transmisión y/o refuerzos de la red actual. Inversiones en sistemas de almacenamiento de energía, dispositivos de impedancia variable flexible (FACTS), sistemas de compensación serie y paralelo, tecnología HVDC, ajuste de protecciones, entre otros, son requeridos como mecanismos de control y se deriva en señales de inversión que impactan a los negocios de los diferentes agentes del sector, limitando o encareciendo la inclusión de las FERNC en el sistema eléctrico de potencia (Markets, 2019).

Muchas de estas inversiones deberán ser asumidas por el transportador propietario del punto de conexión de las FERNC, como lo son las ocasionadas por los nuevos esquemas de protección, si bien el propietario del parque generador debe cumplir con la instalación y coordinación de sus protecciones, el transportador deberá realizar un estudio de ajuste de sus protecciones actuales considerando las FERNC, lo que podrá originar la implementación de nuevos esquemas y/o incorporación de relés que cumplan con la función requerida.

Por otro lado, se espera que las inversiones asociadas a equipos de compensación y almacenadores de energía, entre otros, estén apalancadas por convocatorias públicas de la UPME para expansión de la red, dado que son refuerzos requeridos para viabilizar la conexión de las FERNC al SIN, por lo que serían ingresos para las empresas dedicadas al transporte de energía eléctrica en Colombia.

Así mismo, las empresas transportadoras que estudien la opción de construir líneas con tecnología HVDC, podrán obtener una reducción en los costos de las pérdidas de transmisión, que se convertirá en ahorro energético durante la vida útil de la línea de transmisión, que podrá compensar de cierta manera la inversión que implica este tipo de tecnología (Kashyap et al., 2018).

Otro aspecto a destacar es la necesidad de elaborar estudios de conexión a la red para las FERNC, lo que deriva en clientes para las empresas dedicadas al transporte, las cuales hoy en día tienen este servicio en su portafolio de estudios.

5.3.2 Cultural y Social

Teniendo en cuenta que los recursos naturales (viento, energía solar, fuertes caídas de agua, actividad volcánica) se encuentran en zonas de reserva natural, de propiedad indígena o afrocolombiana, el desarrollo de proyectos asociados a las FERNC impone retos que implica nuevos compromisos de las organizaciones para afrontar los desafíos sociales y culturales, que consideren la diversidad a lo largo del territorio colombiano. En dónde se considere la inclusión de procesos de consulta previa para la instalación de las FERNC en ciertas zonas del país, que permitan identificar las necesidades de las comunidades, y de esta manera proponer programas de inclusión social que integren dichas necesidades con los objetivos del sector, y así viabilizar la transición energética requerida.

Así mismo, los agentes e instituciones interesadas en el desarrollo de las FERNC en Colombia, tienen la obligación de educar a la comunidad en temas como la eficiencia energética, los recursos energéticos distribuidos y bonos de carbono, entre otros, para captar a un mayor número de personas y lograr una difusión masiva. Así como buscar el apoyo del gobierno para promover la investigación en las universidades y contribuir de manera efectiva a la transición del sector eléctrico.

Lo que conlleva a definir un plan de transformación o alineación para cerrar las brechas entre la cultura requerida y la cultura actual de la organización, formar a empleados como facilitadores de cambio que aporten a dicha transformación. Teniendo como meta una cultura que esté alineada

con la transición del sector eléctrico y el desarrollo sostenible del país, que promueva la diversidad, la apertura y la inclusión.

5.4 Conclusiones

Conocer los estudios, investigaciones y las experiencias de otros sistemas, mercados, países y organizaciones alrededor de los impactos de las FERNC en los sistemas de transmisión de energía eléctrica, permite tener cierto grado de certidumbre que facilita responder a los desafíos que su integración plantea.

Así mismo, es importante evidenciar los cambios que las empresas transmisoras deben empezar a incorporar en su estrategia, en donde, de cara a los nuevos retos del sector, es posible que se enfrenten a variaciones en sus ingresos, cultura y sostenibilidad de los negocios actuales.

6. Conclusiones y Trabajos Futuros

6.1 Conclusiones asociadas con el logro de los objetivos definidos

En Colombia, la integración de las FERNC cada vez se presenta con más fuerza, al punto de empezar a sentar las bases que justifican la adopción de una estrategia para su desarrollo. Esta adopción ejerce responsabilidades de planeamiento y desarrollo de infraestructura que traen consigo retos para la transmisión y que impactarán la estrategia de las empresas dedicadas a dicha actividad

A continuación, se presentan las conclusiones de este trabajo final de maestría de acuerdo con los objetivos definidos para el logro y cumplimiento del objetivo general, esperando contribuir al debate y la toma de decisiones sobre la inclusión de las renovables no convencionales en el negocio actual de la transmisión de energía eléctrica en Colombia.

6.1.1 Objetivo específico 1

“Identificar el impacto de la entrada de las FERNC sobre el sistema de transmisión nacional”.

El capítulo cinco, sección 5.2 muestra un resumen de los impactos identificados a nivel mundial por la entrada de las FERNC en los sistemas de transporte de energía, encontrando afectaciones en el perfil de voltaje, confiabilidad de los sistemas, pérdidas de la red, capacidad de transferencia de las líneas de transmisión y protecciones eléctricas, sumado a nuevas necesidades de planeamiento que ejerce el sistema debido al aumento de la incertidumbre inherente derivado de estas fuentes.

Así mismo, se evidencia la necesidad de estudiar la pertinencia de la regulación actual considerando la inclusión de las FERNC en la red, y de esta manera replantear su aplicación y vigencia.

6.1.2 Objetivo específico 2

“Identificar el impacto de la entrada de las fuentes de energía renovables no convencionales sobre las empresas transmisoras de energía”.

El capítulo cinco, sección 5.3 presenta los impactos identificados por la entrada de las FERNC en las empresas transmisoras, encontrando impactos en términos de inversiones futuras y necesidades de alineación de cultura empresarial para lograr la transformación energética.

Lograr una red de transporte robusta, fiable, interconectada y dotada de la suficiente inteligencia para afrontar los retos de la transición energética, va a requerir importantes inversiones, no solo orientadas al enmallamiento de la red o el incremento del nivel de interconexiones, sino también a la incorporación de nuevas tecnologías y su adaptación a los nuevos usos de la red que permitan garantizar la seguridad del sistema; es decir, inversiones en modernización y digitalización.

Por otro lado, la transformación energética genera nuevos compromisos de las organizaciones para afrontar los desafíos sociales y culturales, que consideren la diversidad a lo largo del territorio colombiano y la inclusión de la comunidad.

6.1.3 Objetivo general

“Proponer recomendaciones para afrontar los impactos que producirían la entrada de las fuentes de energía renovables no convencionales sobre el negocio de transmisión de energía eléctrica en Colombia”.

El éxito de la transición energética que está viviendo el sector eléctrico radica en que los nuevos recursos renovables se puedan conectar a la red de transporte al ritmo necesario, para lo cual será imprescindible su desarrollo soportado en los objetivos de gobierno, por lo que el transmisor deberá actuar de forma proactiva exponiendo oportunamente las nuevas necesidades requeridas para la conexión de estos recursos.

A partir de los impactos identificados en el capítulo cinco, sección 5.2, se encuentran soluciones correctivas que permiten viabilizar la integración de las FERNC al STN, como la instalación de un compensador estático de potencia reactiva SVC para fortalecer la estabilidad de los generadores, y de esta manera, amortiguar las oscilaciones y mejorar la confiabilidad del sistema, se recomienda el transporte de energía a altos niveles de tensión para disminuir las pérdidas, así como también se propone el uso de FACTS y la inclusión de un sistema de compensación serie en líneas largas, para aumentar la capacidad de transferencia de potencia por las líneas, y así maximizar la cantidad de energía transferida a través de ellas.

Además de las soluciones correctivas, también se consideran nuevas tecnologías para ser consideradas en la planeación de los nuevos sistemas de transmisión, como la tecnología HVDC que ofrece valores de pérdidas muy inferiores a las de las líneas equivalentes de corriente alterna (AC), y los recursos de almacenamiento para garantizar la seguridad de suministro.

Así mismo, aumentar la participación de FERNC en el SIN requiere de un importante esfuerzo a nivel tecnológico, que va de la mano con el aumento de la infraestructura de transporte de energía en las zonas con mayor potencial renovable, mediante la licitación y construcción de nuevas líneas de transmisión e implementando los refuerzos necesarios para el correcto funcionamiento de la red, de esta manera se aporta a la eliminación de barreras para la transición energética.

El desarrollo y despliegue de las FERNC constituyen una realidad imparable que impactará al sector eléctrico, al punto de motivar a las empresas que hacen parte de él, a cambiar sus estrategias para responder a los retos de la transición energética. En dónde se considere la inclusión de procesos de consulta previa para la instalación de las FERNC en ciertas zonas del país, que permitan identificar las necesidades de las comunidades, y de esta manera proponer programas de inclusión social que integren dichas necesidades con los objetivos del sector, y así viabilizar la transición energética requerida.

Finalmente, se recomienda a los agentes e instituciones interesadas en el desarrollo de las FERNC en Colombia, seguir educando a la comunidad en temas como la eficiencia energética, los recursos energéticos distribuidos y bonos de carbono, entre otros, para captar a un mayor número de personas y lograr una difusión masiva. Así mismo, se debe buscar el apoyo del gobierno para promover la investigación en las universidades y contribuir de manera efectiva a la transición del sector eléctrico.

6.2 Trabajos Futuros

- Realizar un análisis costo - beneficio de la inclusión de las FERNC en el sistema eléctrico colombiano, que permita medir el índice neto de rentabilidad de las empresas dedicadas al transporte de energía. Evaluando no solo el retorno financiero de las inversiones, sino también de los aspectos sociales y medio ambientales. De esta manera aportar a la toma de decisiones para los transmisores de energía ante los retos impuestos por la transición energética.
- Realizar una revisión de los posibles nuevos roles que surgirán con la entrada de las FERNC en el sector eléctrico, en donde el transmisor de energía pueda verse proyectado siempre que las leyes y regulación actual lo permita. Así mismo, proponer recomendaciones para viabilizar dichos roles en el sector.

7. Bibliografía

- Ahmed, S., Zafran, M., Khan, F. M., Waqar, M. A., & Hasan, Q. U. (2018). Impact of integrating wind and solar energy on vulnerable power systems. *Proceedings of 2017 International Multi-Topic Conference, INMIC 2017, 2018-Janua*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/INMIC.2017.8289461>
- Arce Zapata, G., Humberto Ramirez Director General UPME, R., Públicas de Medellín ESP Codensa ESP ISAGEN SA ESP Electricaribe SA ESP TERMOBARRANQUILLA SA ESP, E. S., Esp Generación, S., Henao Ramírez, W. J., Zapata Lesmes, H. J., ... Rodríguez Hernández, R. (2018). *PLAN DE EXPANSIÓN DE REFERENCIA GENERACIÓN – TRANSMISIÓN 2017 –2031*. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2017/Plan_GT_2017_2031.pdf
- Assembayeva, M., Zhakiyev, N., & Akhmetbekov, Y. (2017). Impact of storage technologies on renewable energy integration in Kazakhstan. *Materials Today: Proceedings*, 4(3), 4512–4523. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.04.024>
- BANCOLOMBIA, G. (n.d.). Panorama energético de Colombia. Retrieved from <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/actualidad-economica-sectorial/especiales/especial-energia-2019/panomara-energetico-colombia>
- Bayindir, R., Demirbas, S., Irmak, E., Cetinkaya, U., Ova, A., & Yesil, M. (2016). Effects of renewable energy sources on the power system. *Proceedings - 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2016*, 388–393. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2016.7752029>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). *Creg100-2019*. , (2019).
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2019b). Estructura del Sector Eléctrico. Retrieved October 6, 2019, from <http://www.creg.gov.co/sectores/energia-electrica/estructura-del-sector>
- Cueva, I., Sigüencia, J., Ramón, P., & Cando, P. (n.d.). *Aplicación de FACTS en Líneas de Transmisión*.
- Dinero, R. (2019). *Renovables, el revolcón energético*. Retrieved from <https://www.dinero.com/pais/articulo/cual-es-el-impacto-de-las-energias-renovables/279010>
- Gutierrez, J., & Lopez, D. (n.d.). *ENERGÍA RENOVABLE DISTRIBUIDA Y REMUNERACIÓN DE LOS STR Y EL STN: PERSPECTIVAS Y EXPERIENCIA INTERNACIONALES*. Medellín.
- Holguin Ramírez, M. C. (2018). Integración de energías renovables en Colombia. Retrieved from Bugard SAS website: <http://www.bugardsas.com/?p=974>
- INTERCOLOMBIA S.A. E.S.P. (2019). Red en Operación. Retrieved from <http://www.intercolombia.com/Paginas/Home.aspx>
- ISA S.A E.S.P. (2019). Transporte de energía eléctrica. Retrieved October 6, 2019, from <http://www.isa.co/es/isa-y-sus-negocios/Paginas/transporte-de-energia-electrica.aspx>
- Kashyap, R., Ahmad, F., El-Amin, I., Abdel-Galil, T. K., & Arif, M. (2018). Impact of addition of large scale renewable generation in North West Territory of KSA. *2017 9th IEEE-GCC Conference and*

Exhibition, GCCCE 2017, 1, 1–9. <https://doi.org/10.1109/IEEEGCC.2017.8448052>

MARIANA LÓPEZ CEBALLOS, RAMÓN A. GALLEGO R., R. A. H. I. (2010). Mejoramiento Del Perfil De Tensión En Sistemas De Distribución Usando Generación Distribuida. *Mejoramiento Del Perfil De Tensión En Sistemas De Distribución Usando Generación Distribuida*, (44), 310–315.

Markets, A. E. (2018). *Líder mundial en energías renovables*. Retrieved from <https://www.accionacom.es/lineas-de-negocio/energia/>

Markets, A. E. (2019). *ACCIONA ENERGY MARKETS ENERGY MANAGEMENT Jun 2019*. 1–10.

Ministerio de Minas y Energía. (2018). *Decreto 0570 de 2018*. 5. <https://doi.org/10.1111/jnc.14333/full>

Paredes, J. R., & Ramirez, J. J. (2017). Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: *Banco Interamericano de Desarrollo*, 62. Retrieved from <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8146/Energias-renovables-variables-y-su-contribucion-a-la-seguridad-energetica-Complementariedad-en-Colombia.PDF?sequence=5>

Red Eléctrica de España (REE). (2019a). *Red eléctrica y la integración de renovables*. 56. Retrieved from https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/Transicion_Energetica.pdf

Red Eléctrica de España (REE). (2019b). *Resultados 2018 & Plan Estratégico 2018-2022*. Retrieved from https://www.ree.es/sites/default/files/06_ACCIONISTAS/Documentos/Hechos_relevantes/2019/20190219-HR_Resultados_Plan_Estrategico_2018_2022.pdf

REN21. (2019). *REN21 - 2019 Global Status Report*. Retrieved from <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28496/REN2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://www.ren21.net/cities/wp-content/uploads/2019/05/REC-GSR-Low-Res.pdf>

Sulakov, S. I. (2016). Forced renewables penetration impact on ohmic transmission losses. *2016 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2016*, 1(3), 1–4. <https://doi.org/10.1109/SIELA.2016.7543052>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. In *Ministerio de Minas y Energía*. <https://doi.org/10.1021/ja304618v>

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2019). *Proyección Demanda de Energía Eléctrica*.

Unidad de Planeamiento Minero-Energético (UPME). (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. *Ministerio de Minas y Energía*.

Urbina, C. J. D. (2015). *Análisis del impacto sobre las protecciones eléctricas al instalar sistemas solares fotovoltaicos en una red de distribución con nivel de tensión 13.2 kV*. 124.

- Wu, Y. K., Lee, X. C., Hu, C. Y., & Yang, W. H. (2017). Evaluation of the maximum allowed capacity of offshore wind power in Taiwan based on the existing transmission capacity limits. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation: Applied System Innovation for Modern Technology, ICASI 2017*, 590–593. <https://doi.org/10.1109/ICASI.2017.7988492>
- XM S.A E.S.P. (n.d.-a). *Mapa de ruta XM*. Retrieved from <http://www.xm.com.co/Paginas/Renovables/Mapa-de-ruta-XM.aspx>
- XM S.A E.S.P. (n.d.-b). *Propuesta Regulatoria Fuentes De Generación No Síncrona*.
- XM S.A E.S.P. (2016). *informe de Operación del SIN y Administración del Mercado*. Retrieved from <http://informesanuales.xm.com.co/2016/SitePages/operacion/1-1-Presentacion.aspx>
- XM S.A E.S.P. (2017a). *FUENTES DE GENERACIÓN*.
- XM S.A E.S.P. (2017b). *Propuesta De Requerimientos Técnicos Para La Integración De Fuentes De Generación No Síncrona Al Sin*. 28.
- XM S.A E.S.P. (2018). *Generación del SIN*. Retrieved from <http://informes.xm.com.co/gestion/2018/servicio-confiable-eficiente-competitivo-y-mas-limpio/oferta-y-generacion/Paginas/generacion-del-sin.aspx>
- XM S.A E.S.P. (2019a). *Capacidad del SIN*. Retrieved from <http://www.xm.com.co/Paginas/Indicadores/Oferta/Indicador-capacidad-sin.aspx>
- XM S.A E.S.P. (2019b). *Estructura del Sector*. Retrieved from <http://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/Agentes-del-mercado.aspx>
- XM S.A E.S.P. (2019c). *PARATEC*. Retrieved from <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/Default.aspx>
- XM S.A E.S.P. (2019d). *Qué hacemos?* Retrieved from <https://www.xm.com.co/corporativo/Paginas/Nuestra-empresa/que-hacemos.aspx>
- XM S.A E.S.P. (2019e). *Renovables en el SIN*. Retrieved from <https://www.xm.com.co/Paginas/Renovables/Renovables-no-convencionales-en-el-SIN.aspx>
- Zhang, W. qi, Zhang, X. yan, Huang, S. wei, Xia, Y. kai, Fan, X. chao, & Mei, S. wei. (2017). Evolution of a transmission network with high proportion of renewable energy in the future. *Renewable Energy*, 102, 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.057>