



UNIVERSIDAD EAN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PROYECTOS

MODELO PREDICTIVO DE INTERRUPCIONES DEL SERVICIO DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA DOMICILIARIA DE BOGOTÁ USANDO ANÁLISIS DE DATOS

AUTORES:

JUAN FELIPE LOPERA HERNÁNDEZ  
CARLOS DUVÁN RUIZ PACHECO  
JUAN FRANCISCO CENTENO TORRES

DIRECTOR:

ALIX ERICA ROJAS HERNÁNDEZ

BOGOTÁ D.C., MAYO DE 2019

## **Resumen**

La distribución de Energía Eléctrica en la ciudad de Bogotá es fundamental para el crecimiento de la economía local, los usuarios perciben la calidad como la mínima posibilidad de interrupciones y su duración, así como recibir unos parámetros eléctricos aceptables. Para garantizar esta disponibilidad permanente del servicio y minimizar las afectaciones al usuario evitando sanciones y multas considerables, el operador del servicio dispone un presupuesto para el mantenimiento de sus activos, que para el año 2018 estuvo cercano a los 246.000 millones de pesos. Sin embargo, a pesar de ser una cifra importante, no fue posible evitar fallas ni cortes, súbitos. Por otro lado, tenemos una entidad estatal con tecnología de vanguardia que captura y almacena datos de clima en más de cincuenta estaciones de toma de información hidro climatológica en la ciudad. En la presente investigación mediante el uso de KDD y la minería de datos, se logra concluir cómo con la información actual existente por parte del operador del sistema de distribución de energía en Bogotá y la información capturada y almacenada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se relacionan, permitiendo establecer un modelo que ayuda a mejorar los indicadores de calidad, en la prestación del servicio.

**Palabras Clave** — KDD, minería de datos, base de datos, predicción de eventos, análisis de datos, fallas eléctricas.

## ***Abstract***

*The distribution of Electric Power in the city of Bogotá is fundamental to guarantee the growth and development of the different sectors of the local economy. The quality in the provision of the service, in the majority of users, is perceived as the minimum possibility of interruptions and its duration, as well as receiving acceptable electrical parameters. To guarantee this permanent availability of the service and to minimize the effects on the user, avoiding penalties considerable, the operator of the energy distribution service in the capital has a budget for the maintenance of its assets, which by the year 2018 was close to 246,000 millions of pesos. However, despite being an important amount of money, it was not possible to avoid failures or sudden cuts. In many cases the*

*interventions were corrective and the service was interrupted unexpectedly for users. On the other hand, we have a state entity with state-of-the-art technology that captures and stores climate data in more than fifty hydro climatological information stations in the city. In the present investigation through the use of KDD and data mining, it is possible to conclude how with the current information on the part of the operator of the energy distribution system in Bogotá and the information captured and stored by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) are related, allowing to establish a model that helps improve quality indicators, in the provision of the service, when the operator moves forward with programmed actions to future failures, in this way resources can be distributed in a more efficient manner, achieving significant savings in the budget and increasing user satisfaction.*

**Keywords** — *KDD, data mining, database, evento prediction, data análisis, outages.*

## TABLA DE CONTENIDO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                 | 7  |
| 2     | OBJETIVOS .....                                 | 8  |
| 2.1   | Objetivo General .....                          | 8  |
| 2.2   | Objetivos Específicos .....                     | 8  |
| 3     | JUSTIFICACIÓN .....                             | 8  |
| 4     | MARCO TEÓRICO.....                              | 10 |
| 4.1   | Energía eléctrica en el mundo.....              | 10 |
| 4.1.1 | Producción y consumo .....                      | 10 |
| 4.1.2 | Calidad del servicio .....                      | 12 |
| 4.2   | Energía eléctrica en Colombia .....             | 16 |
| 4.2.1 | Legislación .....                               | 16 |
| 4.2.2 | Demanda.....                                    | 17 |
| 4.2.3 | Calidad y confiabilidad del servicio.....       | 19 |
| 4.3   | Anatomía Eléctrica de una Falla.....            | 22 |
| 4.3.1 | Tipos de fallas .....                           | 22 |
| 4.3.2 | Falla por materiales y elementos externos ..... | 23 |
| 4.4   | Predicción de fallas .....                      | 24 |
| 5     | METODOLOGÍA.....                                | 25 |
| 5.1   | Obtención de datos .....                        | 25 |
| 5.2   | Preparación y limpieza .....                    | 25 |
| 5.3   | Tratamiento .....                               | 26 |
| 5.4   | Procesamiento .....                             | 27 |
| 6     | VARIABLES .....                                 | 27 |
| 6.1   | Variables independientes .....                  | 27 |
| 6.2   | Variables dependientes .....                    | 28 |
| 7     | HIPÓTESIS .....                                 | 28 |
| 8     | RESULTADOS .....                                | 28 |
| 9     | DISCUSIÓN .....                                 | 30 |
| 10    | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....            | 32 |
| 11    | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                 | 33 |

## LISTADO DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Producción bruta total de electricidad.....   | 10 |
| <b>Figura 2.</b> Producción bruta de electricidad de la OCDE por fuente .....                        | 11 |
| <b>Figura 3.</b> Consumo final de electricidad mundial por sector .....                              | 12 |
| <b>Figura 4.</b> SAIDI sin planear (minutos por cliente) .....                                       | 13 |
| <b>Figura 5.</b> SAIFI sin planear (interrupciones por cliente) .....                                | 15 |
| <b>Figura 6.</b> Comparación del consumo de energía por habitante en América Latina y el Caribe..... | 18 |
| <b>Figura 7.</b> Indicador SAIDI nacional v/s SAIDI por empresa en 2017. ....                        | 21 |
| <b>Figura 8.</b> Indicador SAFI nacional v/s SAIFI por empresa en 2017. ....                         | 21 |
| <b>Figura 9.</b> Resumen resultado análisis Weka 3.8.....  | 31 |
| <b>Figura 10.</b> Fragmento del modelo generado.....   | 31 |

## LISTADO DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Proyecciones de la población de Bogotá y Cundinamarca. .... | 18 |
|---|----|

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Ley 142 del Congreso de la República de Colombia (1994), o ley de servicios públicos, clasifica a la energía eléctrica como un servicio público domiciliario y en su artículo 134 establece que: “Cualquier persona capaz de contratar que habite o utilice de modo permanente un inmueble, a cualquier título, tendrá derecho a recibir los servicios públicos domiciliarios al hacerse parte de un contrato de servicios públicos”. De la misma ley, se obtiene en el artículo 5 que los servicios públicos se deben prestar de manera eficiente.

Así mismo, la Comisión de Regulación de Energía y Gas en la Resolución No. 015 (2018), establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica; la cual establece en su artículo 10 que la remuneración que recibe el operador de red será disminuida cuando se incumplan las metas de calidad de servicio de distribución.

Por otra parte, de acuerdo a los resultados del diagnóstico de calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia 2016, “existen significativas oportunidades de mejora en materia de mejoramiento de la calidad” (Superintendencia Delegada para Energía y Gas Combustible, 2018). De igual forma, se encontró que “en comparación con los resultados del año 2016 la duración y la frecuencia de las interrupciones por usuario en Colombia aumentaron en el año 2017” (Superintendencia Delegada para Energía y Gas Combustible, 2018).

Superintendencia Delegada para Energía y Gas Combustible (2018), informa que de acuerdo a los resultados del diagnóstico de calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia 2016, “existen significativas oportunidades de mejora en materia de mejoramiento de la calidad, habiendo incrementado en el 2017 la duración y frecuencia de las interrupciones del servicio por usuario.

Sin embargo, realizar intervenciones en toda la red de distribución eléctrica de Bogotá para mejorar la calidad del servicio representa una gran inversión, así que es necesario priorizar las intervenciones de tal forma que al optimizar el sistema de distribución de energía eléctrica se reduzca la duración y frecuencia de las interrupciones,

permitiéndole a los usuarios contar con un servicio continuo y una mejor relación costo-beneficio para los accionistas.

Teniendo en cuenta lo anterior, ¿Cómo se puede optimizar el sistema de distribución de energía eléctrica para que mejoren los indicadores de calidad de energía eléctrica en Bogotá a la vez que se obtiene mayor rentabilidad sobre la inversión?

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Desarrollar un modelo predictivo de interrupciones del servicio de energía eléctrica domiciliar de Bogotá usando análisis de datos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Seleccionar las fuentes de datos que se utilizarán para el estudio a realizar.
- Preparar y limpiar los datos para mejorar la calidad de los mismos y obtener resultados más precisos durante el análisis.
- Realizar un tratamiento de los datos que permita consolidarlos con una estructura apropiada para su posterior análisis.
- Procesar los datos a través de algoritmos de Machine Learning que permitan extraer patrones comprensibles.
- Interpretar y evaluar los patrones encontrados en los resultados obtenidos del procesamiento de datos.
- Consolidar el conocimiento encontrado en los datos de forma que sea utilizable para la toma de decisiones.

## **3 JUSTIFICACIÓN**

Las inversiones que realiza Enel Codensa S.A. E.S.P. en mantenimiento correctivo sobre los activos de distribución de la energía eléctrica en Bogotá en el 2018 con corte a finales de septiembre fueron aproximadamente 131.000 millones de pesos (Grupo Enel, 2018), mientras que a la misma fecha del año 2017, la inversión fue aproximadamente 160.000



millones de pesos (Grupo Enel, 2017), y aunque tales valores signifiquen una reducción del 18.12% en la inversión por concepto de mantenimiento correctivo, siguen siendo cifras considerables si tenemos en cuenta que corresponden al 28% y 34.6% de la inversión total a las fechas relacionadas, respectivamente.

El realizar mantenimiento correctivo no solo supone una gran ocupación de los recursos que podrían ser enfocados en otros proyectos, sino que también disminuye la rentabilidad sobre la inversión en general, puesto que al dar de baja un activo en operación a causa de un mantenimiento correctivo, se deja de percibir el reconocimiento económico asociado a dicho activo, a causa de la disminución de la base de activos eléctricos que remunera el gobierno según lo estipulado en la resolución CREG 015.

Con el fin de dar cumplimiento a la reglamentación actual y mejorar la calidad del servicio de energía eléctrica, se necesita un enfoque diferente al que se utiliza normalmente para determinar los planes de inversión, como es el caso de hacer uso de nuevas tecnologías como el análisis de datos que permita aprovechar información contenida en datos aparentemente no relacionados.

Se pretende establecer una metodología basada en análisis de datos, que contemple históricos de las interrupciones, clima, variables eléctricas del sistema y modelos de confiabilidad, permita establecer la probabilidad de ocurrencia de falla de un elemento de la red de distribución de energía eléctrica de Enel Codensa S.A. E.S.P. ante determinadas condiciones y con dicha información se puedan generar planes de acción temprana y así reducir la frecuencia y duración de las interrupciones del servicio.

De esta forma, se puede disminuir las penalizaciones por causa de las interrupciones del servicio de energía eléctrica, y al mejorar la remuneración de la empresa, se obtiene mayor rentabilidad sobre las inversiones, sin olvidar que también se mejora la calidad de vida de las personas afectadas por este problema.

## 4 MARCO TEÓRICO

### 4.1 Energía eléctrica en el mundo

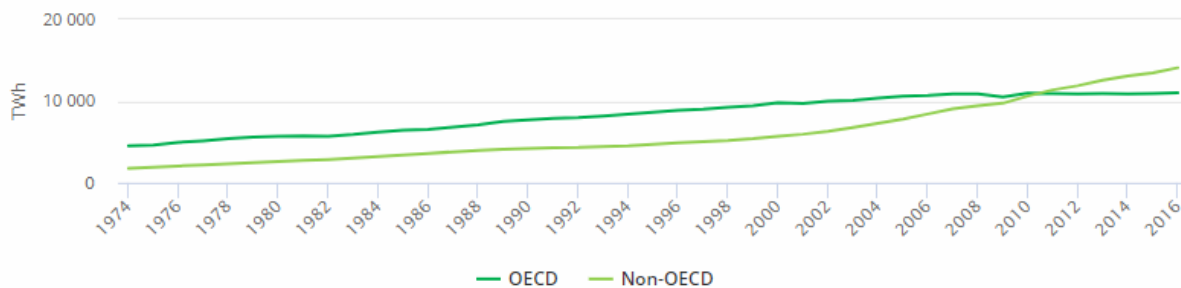
#### 4.1.1 Producción y consumo

Según Birol (2006), las necesidades de energía a nivel global probablemente se incrementen por lo menos en las siguientes dos décadas, de tal forma que para el 2030, se requiera más del 50% de energía para suplir las necesidades existentes en el 2005, lo que implicaría un ratio sostenido de crecimiento anual del 1.6%.

La anterior posición es respaldada por International Energy Agency (2018), quien en su reporte Energy Information 2018 evidencia que entre 1974 y 2016 la producción de energía eléctrica ha aumentado en promedio a un ratio de 3.3% anual.

Al tomar como referencia los países adscritos a la OCDE para analizar la producción global, se obtiene que desde 1974 hasta 2000 ambos grupos (OCDE y no OCDE) tenían un crecimiento proporcional de la producción de energía eléctrica; sin embargo, a partir del año 2000, la producción los países por fuera de la OCDE, a tal punto que en el 2011 sobrepasa a los países pertenecientes a la mencionada organización.

**Figura 1.** Producción bruta total de electricidad



IEA. All rights reserved.

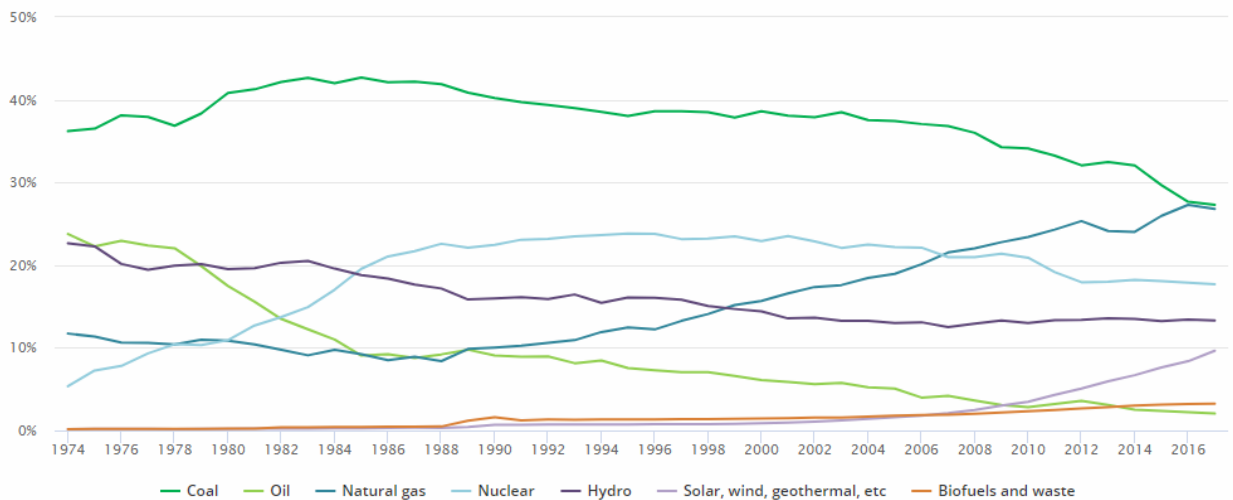
**Fuente.** International Energy Agency, (2018)

Se encuentra diferencias en la producción y consumo de energía eléctrica entre pertenencia a una organización como la OCDE debido a que como lo manifiesta Yu, et al. (2011), factores como la población, el nivel desarrollo social, nivel de desarrollo

urbano, estándares de vida y condiciones naturales, tienen incidencia directa en el consumo de energía eléctrica.

De acuerdo con International Energy Agency (2018), en su informe World Energy Outlook 2018, presenta a la energía eléctrica como la “estrella del show” debido a que ha sido el sector energético que más cambios y mayor crecimiento ha tenido desde su creación desplazando a energías fósiles, puesto que el desarrollo de nuevas tecnologías han permitido el aprovechamiento de nuevas fuentes de energía para convertirlas en energía eléctrica e impulsados por los 17 objetivos mundiales de desarrollo del milenio promovidos por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2015), específicamente por los objetivos No. 7 y 12, que buscan garantizar la producción y consumo sostenible de energía haciendo uso de los recursos naturales renovables que permita reducir el impacto ambiental y a su vez permitir el acceso de dicha energía a toda la población.

**Figura 2.** Producción bruta de electricidad de la OCDE por fuente



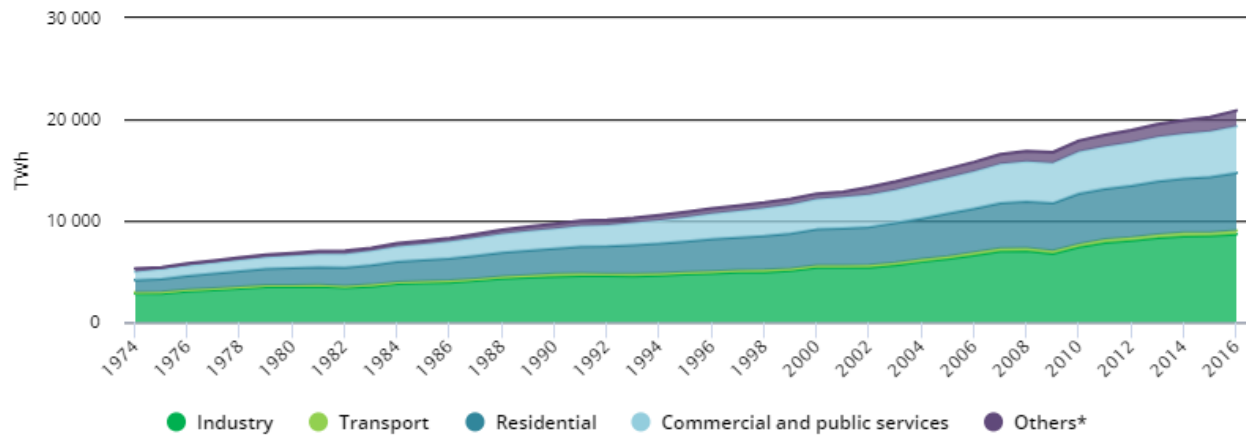
IEA. All rights reserved.

**Fuente.** International Energy Agency, (2018)

### 4.1.2 Calidad del servicio

Teniendo en cuenta el incremento de producción y consumo que se ha venido presentando y las proyecciones realizadas por International Energy Agency (2018), se vuelve necesario contar con redes de distribución de energía eléctrica confiables.

**Figura 3.** Consumo final de electricidad mundial por sector



**Fuente.** International Energy Agency, (2018)

Como se puede observar en la Figura 3, el sector que mayor crecimiento en consumo de energía eléctrica ha sido el industrial; por lo tanto, el impacto económico que puede tener la interrupción del servicio en este tipo de clientes hace que la confiabilidad de la red sea una gran preocupación ya que el sistema de distribución desempeña un papel vital al momento de entregar la energía y asegurar la continuidad del suministro a los clientes (Bichpuriya, Navalkar, & Soman, 2011).

Y es que como lo reporta Ignatova, Villard, & Hypolite (2015), se estima que entre el 30% y 40% del tiempo de inactividad de una empresa se debe a problemas de calidad del servicio de la energía eléctrica.

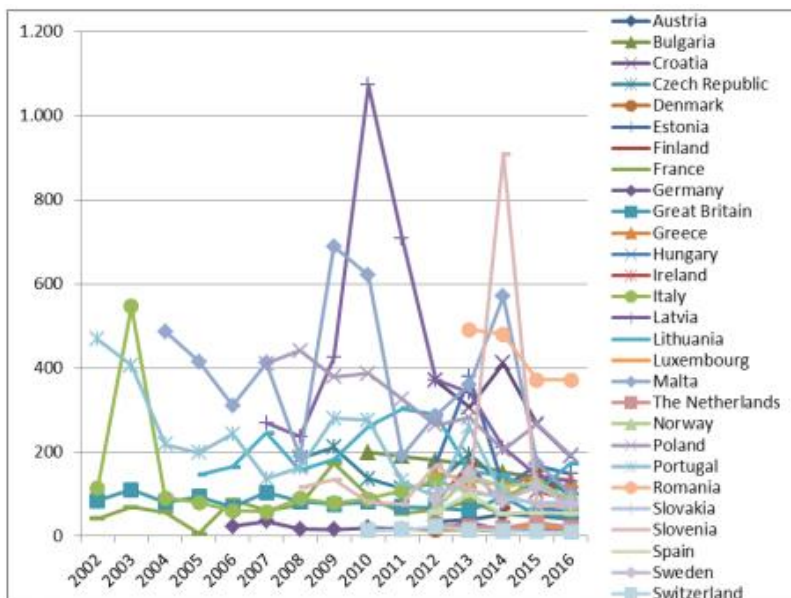
Con el objetivo de medir la calidad del servicio de energía eléctrica, se crearon una serie de indicadores estandarizados a nivel mundial que permiten medir la frecuencia y tiempo de suspensiones del servicio de energía eléctrica, tales como el SAIDI, SAIFI y CAIDI.

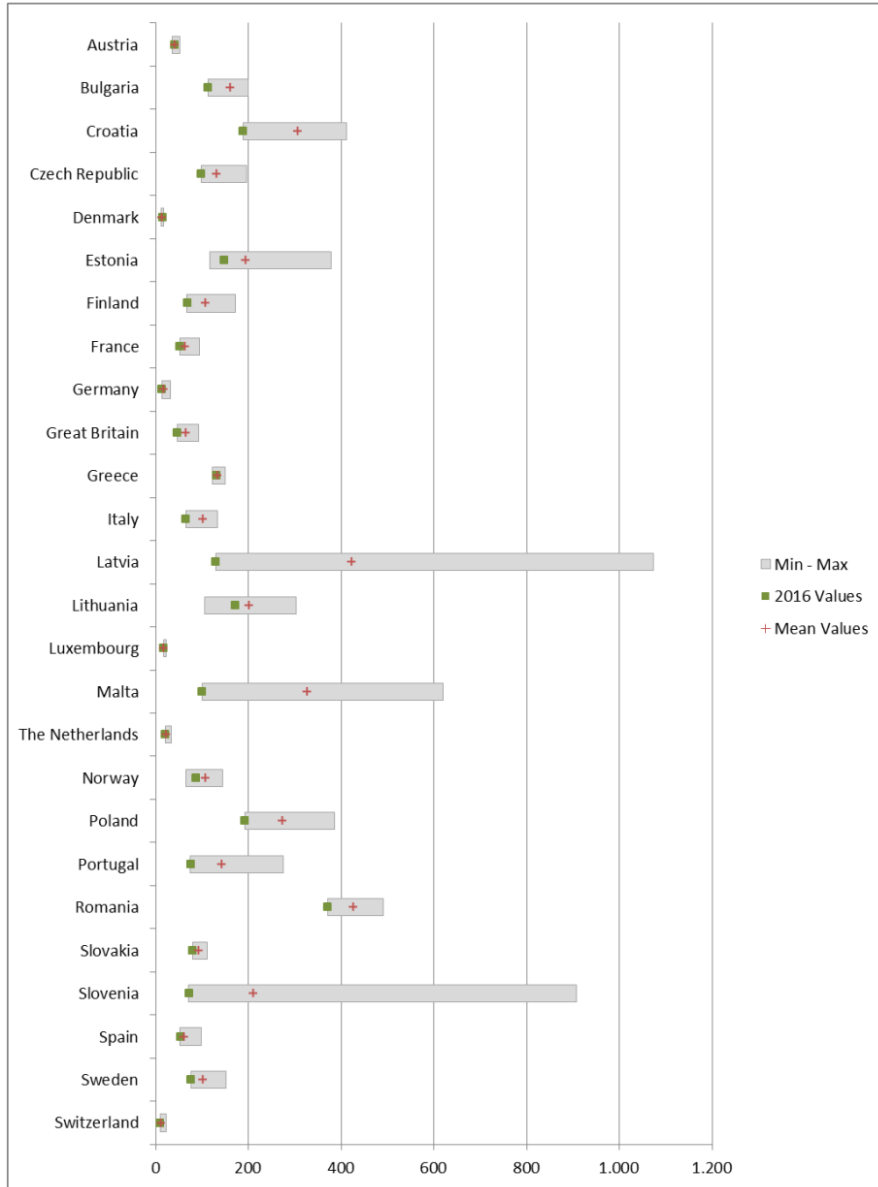
El SAIDI (System average interruption duration index) mide el número de minutos durante el año en los cuales el cliente promedio se encuentra sin servicio (Burns & McDonnell, 2004).

El SAIFI (System average interruption frequency index) mide el número de interrupciones del servicio que un cliente promedio experimenta durante un año (Burns & McDonnell, 2004).

Con el fin de poner en contexto la calidad del servicio energía en diferentes países, a continuación, se presentan medidas de los indicadores anteriormente descritos.

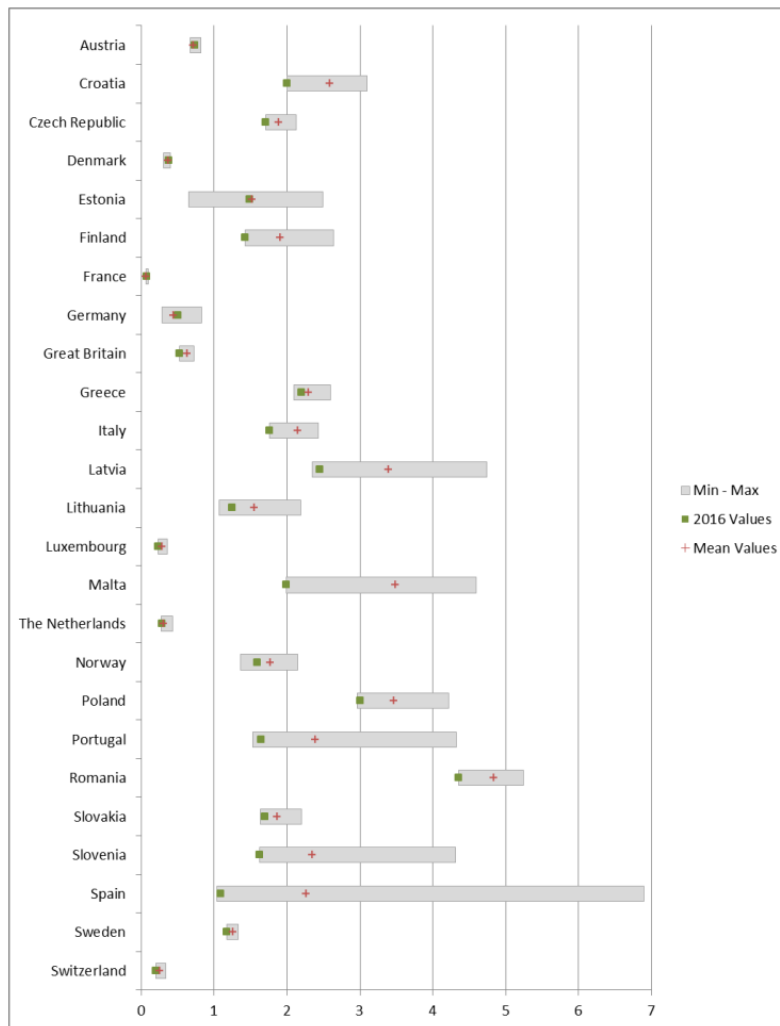
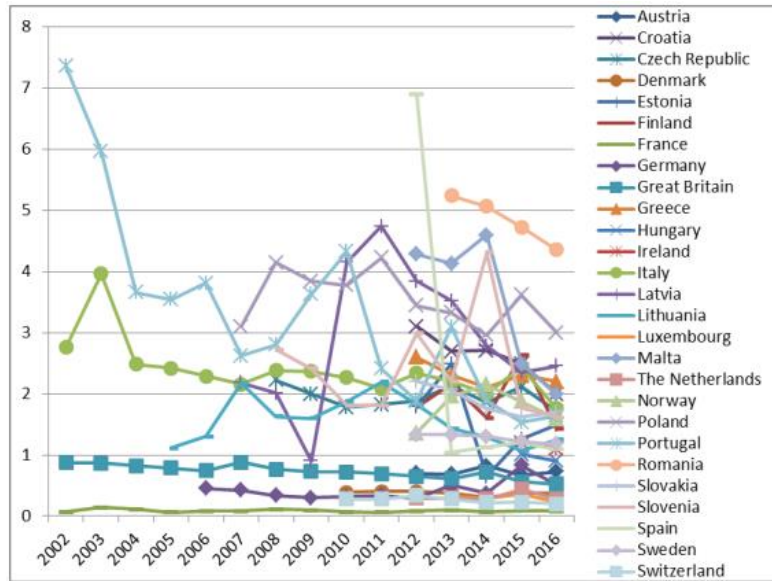
**Figura 4. SAIDI sin planear (minutos por cliente)**





Fuente. Council of European Energy Regulators (2018)

**Figura 5. SAIFI sin planear (interrupciones por cliente)**



**Fuente.** Council of European Energy Regulators, (2018)

## **4.2 Energía eléctrica en Colombia**

En Colombia, para 2012 se publica *Potencia Eléctrica – Radiografía de un sector modelo y estratégico en el mundo*, (Sáenz, 2012), este texto resume como ha sido la evolución del suministro y distribución del servicio de energía eléctrica en Colombia. Según el autor, se tienen registros que la energía eléctrica llega a Bogotá en 1890, gracias a la inversión de privados, inicialmente alumbrando con bombillas algunas de las principales calles, posteriormente la cobertura se fue ampliando a hogares, por supuesto, aquellos con mayores recursos económicos inicialmente, y poco a poco se fue masificando su cobertura. Para 1946 se crea la primera entidad para regular el negocio de la generación y distribución, cuyo nombre fue electroaguas (Instituto de aprovechamiento de aguas y fomento eléctrico), posteriormente en 1968 se denomina ICEL, Instituto Colombiano de Energía Eléctrica.

Para mediados del siglo pasado empiezan los primeros procesos de interconexión regionales y se crea Interconexión Eléctrica S.A. ISA, en 1967, a partir de este momento empieza un acelerado proceso de crecimiento de la infraestructura y la demanda, sin embargo, en la década de los 90's, el país se ve afectado de un periodo de racionamiento que obliga al gobierno a establecer medidas y controles para evitar nuevamente poner en riesgo el país y la afectación de los usuarios. Creando inicialmente la CRE (Comisión reguladora de Energía) que posteriormente se denominó CREG (Comisión Reguladora de Energía y Gas), así mismo la Unidad de Información Minero Energética (UIME) y la comisión de planeación minero energética UPME.

### **4.2.1 Legislación**

Para la década de los 90's se consolida el marco legal bajo el que se regirá la operación del negocio de manejo de la energía como un servicio público, y encontramos la Ley 142 de 1994, la cual termina el monopolio de la prestación de los servicios públicos y establece que la labor del estado es garantizar que la prestación de estos servicios sea adecuada, eficiente y respete el marco legal establecido por dicha ley (Congreso de la República de Colombia, 1994). Esta ley en su artículo 4 determina que la prestación del servicio de suministro de Energía es un servicio público esencial por tanto el usuario deberá contar con dicho servicio de forma permanente, impidiendo que las empresas



prestadoras puedan ejercer derechos constitucionales como el derecho a huelga, toda vez que el usuario no puede quedarse sin la prestación del servicio. La resolución 015 de 2018 (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2018), mediante la cual se establece la forma en que se va a remunerar la prestación de los servicios de distribución de energía eléctrica, en el sistema interconectado nacional, define los siguientes aspectos que durante la presente investigación resultan relevantes y de referencia permanente:

- **Indisponibilidad:** Tiempo durante el cual un activo que conforma la infraestructura que distribuye el servicio de energía no está en servicio total o parcialmente. (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2018)
- **Evento:** Situación que causa la indisponibilidad de un activo, de forma parcial o total y puede ocurrir de forma programada o no. (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2018)
- **Evento de alto impacto:** Todos aquellos eventos que tengan alguna de las siguientes consideraciones:
  - Involucren más de cincuenta mil (50.000) usuarios en un tiempo de ausencia de fluido eléctrico igual o mayor a 3 horas.
  - Involucre a más del 30% de los usuarios de un operador regional por un tiempo de la ausencia de red igual o mayor a 3 horas.

Considerando el tamaño de algunas de las localidades de Bogotá, su actual población y crecimiento es relevante para la presente investigación resaltar las definiciones anteriormente descritas.

#### **4.2.2 Demanda**

Bogotá y sus municipios conexos han registrado un crecimiento poblacional significativo en las últimas dos décadas, considerando las proyecciones de Humberto Molina, DANE en 2003, relacionadas en la tabla siguiente que las evidencias actuales han dado la razón por ser las proyecciones más ajustadas para el crecimiento poblacional tenemos.

**Tabla 1.** Proyecciones de la población de Bogotá y Cundinamarca.

| <b>Proyecciones de la población de Bogotá y Cundinamarca</b> |             |             |             |             |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>MUNICIPIOS</b>  | <b>1995</b> | <b>2000</b> | <b>2005</b> | <b>2010</b> | <b>2015</b> | <b>2020</b> |
| <b>Bogotá D.C.</b>   | 5.724.156   | 6.539.525   | 7.395.610   | 8.235.624   | 9.003.583   | 9.747.386   |
| <b>Cundinamarca</b>  | 1.854.424   | 2.039.459   | 2.224.870   | 2.410.376   | 2.590.490   | 2.761.415   |
| <b>C/marca + Bogotá</b>                                      | 7.578.580   | 8.578.984   | 9.620.480   | 10.646.000  | 11.594.073  | 12.508.801  |

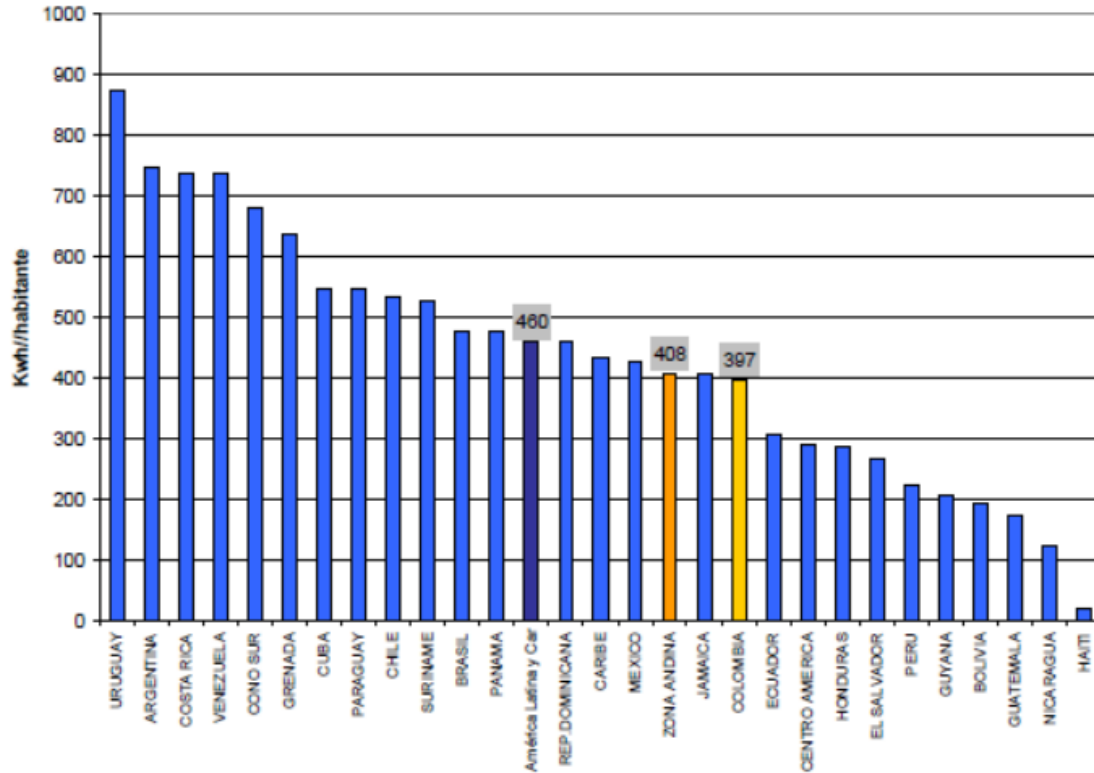
**Fuente.** DANE (2003)

Según datos del Banco Mundial (2015), el consumo per cápita de energía eléctrica en Colombia por persona es de 1219 KWh anuales para 2014. Si consideramos esta estadística, y la población proyectada para el 2020 en Bogotá, la demanda de la ciudad estará cercana a los 370 MWh, lo que implica que un corte en dicho sistema o una interrupción en el fluido podrá generar la afectación de un gran número de ciudadanos, desencadenando costos significativos y posibles sanciones al responsable de la distribución del servicio de energía eléctrica.

Según la UPME (2016), en su informe de Proyección de demanda Energética en Colombia concluye que existe una correlación directa entre el PIB, el crecimiento poblacional y el aumento de temperatura con relación al incremento en el consumo y demanda de energía eléctrica. Fedesarrollo publica en 2016, un informe acerca del análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca (Afanador, Zapata, Nuñez, & Ramirez, 2013), donde resalta que la demanda energética, se puede representar con un algoritmo que relaciona la demanda energética en función del precio, el ingreso real de los consumidores, es decir, su estrato y posibilidades socioeconómicas, el gusto por el consumidor para hacer uso de la energía eléctrica y las expectativas futuras del consumidor.

El alcance del presente estudio es limitado a la ciudad de Bogotá, sin embargo, consideramos relevante contextualizar al lector en la demanda energética que se tiene en Colombia en comparación con los países vecinos de América Latina y el Caribe.

**Figura 6.** Comparación del consumo de energía por habitante en América Latina y el Caribe.



Fuente. Afanador, Zapata, Nuñez, & Ramirez (2013)

#### 4.2.3 Calidad y confiabilidad del servicio.

La demanda por energía eléctrica cada día aumenta y el usuario requiere un servicio de calidad y confiable, entiéndase por calidad que los parámetros eléctricos, de voltaje, frecuencia y secuencia de fases sean los correctos y establecidos por el proveedor del servicio, sino que además que sean correctos, Confiabilidad es que dicha energía y sus registros resulten ser estables en el tiempo y no se presenten cortes en el suministro del fluido eléctrico. Para garantizar que el servicio se preste de forma adecuada, la Comisión de Regulación de Energía y Gas emitió la resolución 70 de 1998, donde se establece el reglamento de distribución de energía eléctrica, como parte del reglamento de operación del sistema interconectado nacional.

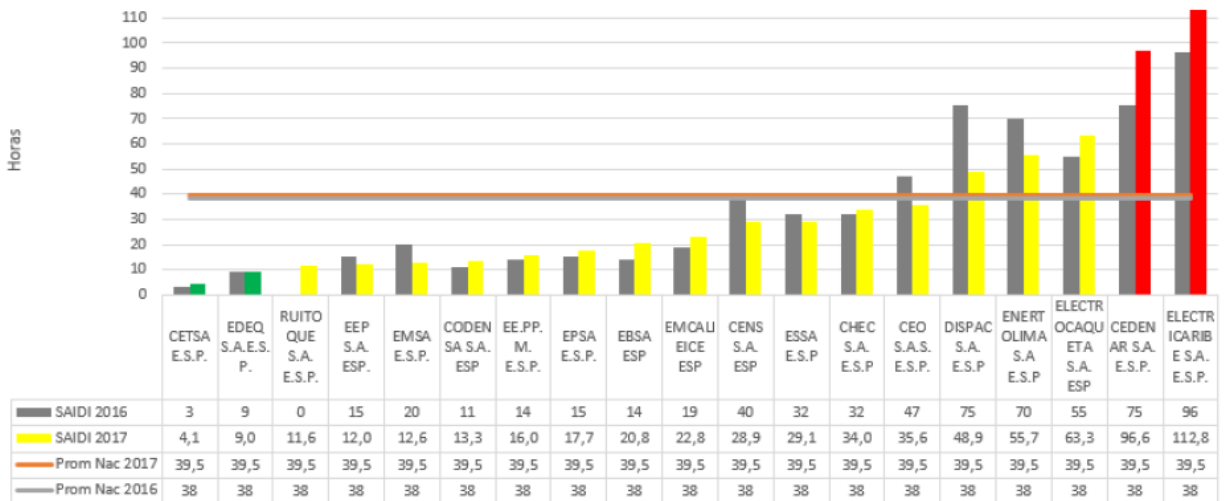
En el capítulo 6 de la resolución 70 de la CREG (1998), se menciona lo referente a la calidad del servicio de los sistemas de distribución nacional y/o distribución local, y

es bajo este reglamento que los prestadores del servicio deben regirse, se establecen los estándares mínimos bajo los cuales los operadores regionales deben prestar el servicio de distribución de energía, de igual forma detalla los estándares de calidad de la potencia suministrada por estos al usuario, así como fija los plazos para corrección de las deficiencias presentadas en la potencia del servicio, de otro lado, referencia los indicadores para la medición de la calidad en el servicio prestado, en función de la duración de la interrupción en el suministro o de acuerdo al origen o causa de dicha interrupción.

La CREG desarrolla unos indicadores de calidad del servicio, mediante los cuales ejerce las labores de vigilancia y control a los diferentes operadores regionales y distribuidores de la energía. La dirección técnica de gestión de energía y la superintendencia delegada para energía y gas en julio 2018 publican un informe referente al diagnóstico de la calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia basado en investigaciones realizadas durante el año 2017 (Dirección Nacional de Planeación, 2018), en el cual detalla con precisión que es la continuidad del servicio de suministro de energía y por qué es importante evaluarla. De este texto extraemos las principales definiciones de los indicadores de calidad en el servicio, los cuales resultan fundamentales para comprender la importancia del presente estudio.

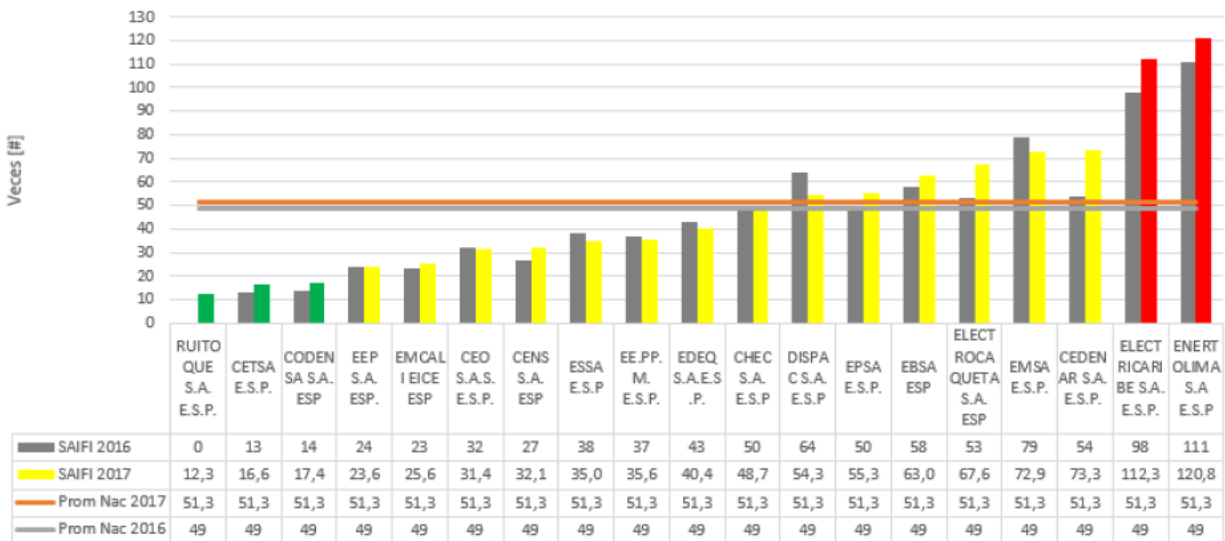
El presente estudio se centra en el análisis de datos de falla obtenidos en la ciudad de Bogotá, por lo cual consideramos relevante conocer el resultado de los principales indicadores de la empresa operadora en Bogotá, frente a las demás empresas del país, cabe resaltar que en alguna de la documentación la referencia al operador será CODENSA, sin embargo, actualmente el operador es ENEL.

**Figura 7.** Indicador SAIDI nacional v/s SAIDI por empresa en 2017.



**Fuente.** Dirección Nacional de Planeación (2018)

**Figura 8.** Indicador SAIFI nacional v/s SAIFI por empresa en 2017.



**Fuente.** Dirección Nacional de Planeación (2018)

Es evidente que el desempeño del operador de la capital comparativamente con el número de usuarios es óptimo respecto a los demás operadores del país, sin embargo, cada año las promesas de servicio a los clientes son más ajustadas y es por esto que resulta fundamental conocer las posibilidades de mejorar los actuales indicadores.

### **4.3 Anatomía Eléctrica de una Falla**

Con el incremento de la demanda, es necesario fortalecer la infraestructura de la distribución de la energía eléctrica, se hace necesario incrementar la cantidad de circuitos, ramales, mediante los cuales llega la energía a los diferentes predios de la ciudad. Estos circuitos se ven expuestos a diferentes tipos de fallas, algunos son afectados por fallas imputables a condiciones atmosféricas y causas naturales como lluvia, rayos, granizo, entre otras. También pueden verse afectados por desgaste o envejecimiento de los componentes, tal es el caso de fallas como roturas en aisladores, daños en transformadores en mal estado, incluso pueden tenerse fallos por cuenta de elementos extraños, como objetos, cometas, animales como roedores, aves, e incluso árboles que terminan en conjunto colapsando el sistema, generando el corte del suministro del fluido y afectando al usuario e incidiendo directamente en el resultado de los indicadores que miden la calidad en el servicio prestado por el operador. (Jamali, Bahman, & Bompard, 2017, págs. 150,157).

#### **4.3.1 Tipos de fallas**

En todos los casos, los diferentes tipos de fallas que se presentan en los sistemas de distribución de energía eléctrica, dejan a los usuarios fuera de cobertura, causando la apertura del circuito. Incluso uno de los más frecuentes es la falta de mantenimiento, toda vez que esta es la principal causa de los cortes no programados. Juan José Mora en su tesis doctoral (Mora, 2006), describe que los principales tipos de fallas son; las fallas del tipo serie y las fallas del tipo paralelo, las cuales pueden ser simétricas o asimétricas. Las fallas del tipo serie, ocurren cuando la interrupción que sufren los conductores no involucra contacto alguno con tierra, mientras que las fallas del tipo paralelo se producen cuando se presenta un cortocircuito a tierra o con otra fase. (Mora, 2006). Estas últimas se clasifican según sea la falla que resulte involucrada en el evento, Monofásicas, cuando la fase hace contacto con tierra, bifásica a tierra, es cuando dos fases hacen contacto a tierra o bifásicas cuando dos fases hacen contacto y finalmente las trifásicas que involucran simultaneidad en el contacto entre fases, y con tierra.

Las fallas simétricas, generalmente son causadas por afectaciones climáticas y generan cortocircuitos trifásicos en la red (Mora, 2006), este tipo de fallas son las que de forma más significativa generan afectación a un número importante de usuarios, involucrando flujos importantes de corriente de falla. Las fallas asimétricas son las más frecuentes en los sistemas de distribución, provocan desbalances de voltaje y corriente en el sistema (Ferro, 2012).

#### **4.3.2 Falla por materiales y elementos externos**

La infraestructura eléctrica para la transmisión de energía requiere de un conjunto de elementos, los cuales, para el caso colombiano, deben ser certificados amparados en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE, creado mediante el Decreto 18039 de 2004, del Ministerio de Minas y Energía, cuyo objeto es definir las obligaciones y responsabilidades de todos los involucrados en los procesos de generación, transmisión y uso final de la energía en Colombia. En el RETIE se fijan los requisitos necesarios para garantizar la protección de las personas y bienes que interactúan con las instalaciones eléctricas, (2013). RETIE en su artículo 33 hace referencia a la certificación de producto, dicha certificación es de carácter obligatorio para todos los productos y sus materiales componentes que sean usados en instalaciones eléctricas en Colombia, de tal suerte que las posibilidades de falla imputables a materiales de mala calidad desde la implementación de RETIE vienen disminuyendo, sin embargo, las fallas en los elementos como consecuencia de falta de mantenimiento y obsolescencia no son subsanables con las consideraciones establecidas en RETIE para la certificación de producto y obligan a las empresas responsables de la infraestructura de transmisión de energía en la ciudad a trazar planes de mantenimiento eficientes y periódicos.

Adicional a las fallas que pueden presentar los elementos componentes de la infraestructura, es relevante tener en cuenta las fallas que se generan como consecuencia de cuerpos extraños que afectan la red, produciendo cortocircuitos y suspensión en el servicio. En 2017 según el operador de la capital se retiraron de las redes de cableado 3192 cometas, que generaron 200 fallas en la prestación del servicio y afectaron 700.000 habitantes de Bogotá, (Caracol, 2017), adicional a las cometas,

también se ven afectadas las redes por cuenta de ramas de árboles, durante las temporadas de vientos, y en las épocas de lluvias.

ENEL, el operador de la capital, desde el segundo semestre de 2016, establece un plan de mitigación de fallas para el cual dispone de un presupuesto de 5400 millones de pesos, 25 cuadrillas de trabajo, para labores preventivas y un incremento en su capacidad de respuesta del 50% (Enel, 2016). Evidenciando la relevancia que tiene el fenómeno de elementos extraños en las afectaciones al suministro de energía y la consecuencia de los mismos cuando se aproxima la temporada de vientos en la ciudad.

#### **4.4 Predicción de fallas**

El análisis predictivo emplea datos históricos para predecir eventos futuros. Normalmente, los datos históricos se utilizan para crear un modelo matemático que capture las tendencias importantes. Este modelo predictivo se usa entonces con los datos actuales para predecir lo que pasará a continuación, o bien para sugerir acciones que llevar a cabo con el fin de obtener resultados óptimos. (MathWorks, s.f.).

De acuerdo Espino (2017), “para llevar a cabo el análisis predictivo es indispensable disponer de una considerable cantidad de datos, tanto actuales como pasados, para poder establecer patrones de comportamiento y así inducir conocimiento”.

Como podemos observar, se puede utilizar el análisis de datos para predecir fallas eléctricas en el sistema de distribución local; por lo tanto, se procederá a describir la tecnología que se usa para generar los modelos predictivos.

El presente estudio pretende encontrar información útil en los datos históricos contenidos en bases de datos, o como explica Maimon & Rokach (2010), “realizar un proceso automático, análisis exploratorio y modelamiento de grandes cantidades de datos en bases de datos”.



## **5 METODOLOGÍA**

El Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos, o KDD por sus siglas en inglés, es el proceso con el cual se pretende encontrar información útil en las bases de datos de la empresa distribuidora de energía de Bogotá que permita crear un modelo predictivo de interrupciones del servicio, puesto que según Maimon & Rokach (2010), KDD explorar, analizar y modelar automáticamente grandes repositorios de datos para identificar patrones entendibles dentro de grandes y complejos conjuntos de datos.

A continuación, se presenta el conjunto de procedimientos que permitirán analizar los datos y obtener información útil para predecir fallas en el sistema de distribución de energía eléctrica de Bogotá.

### **5.1 Obtención de datos**

Como principal fuente de datos se escogió la empresa distribuidora de energía de Bogotá, ya que cuenta con un robusto sistema que almacena, entre otras cosas, los históricos de fallas (desde 2015 hasta 2018) y diferentes datos asociados a las mismas, como lo son la causa, el circuito en falla, los clientes afectados, la hora del evento, etc.

De igual forma, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) cuenta con múltiples estaciones meteorológicas que miden y almacenan información, la cual puede ser solicitada de forma gratuita gracias a la Ley 1712 del Congreso de la República de Colombia (2014), o ley de transparencia y del derecho de acceso a la información pública nacional.

### **5.2 Preparación y limpieza**

Los datos históricos de las fallas eléctricas se obtuvieron en un fichero de MS Excel, el cual contenía columnas que no aportaban información útil o presentaban información repetida; por lo tanto, se procedió a eliminar dichas columnas.

Se revisó que los datos extraídos de los sistemas de Enel Codensa, se eliminaron los registros que contenían información de fallas se habían presentado en activos eléctricos fuera del perímetro de estudio (Bogotá). También se revisó la ortografía en los

datos y realizó estandarización de términos que permitirán obtener estadísticas cualitativas debido a que gran parte de la información contenida en el archivo, al ser ingresado por una persona, puede contener errores tipográficos.

En algunos registros se encontraron celdas vacías que, al no contener información, generaban perturbaciones al momento de agrupar los datos; por lo cual, dependiendo del tipo de información que debía contener, se completó con el valor promedio de todos los registros o se leyó las observaciones asociadas para obtener la información faltante. Cuando no se encontraba el dato buscado, se completó con el valor que mayor frecuencia se presentaba en los registros.

Adicionalmente, se dividió las 24 horas del día en 12 rangos de horas con los cuales fueron clasificado los eventos de falla para agrupar los registros al momento de analizarlos y poder obtener información útil.

Los datos obtenidos del IDEAM fueron entregados en un fichero de texto plano que contenía información de múltiples estaciones meteorológicas de Bogotá, por lo cual fue necesario agrupar la información por estación, posteriormente se estableció formato apto para ser importado por el programa MS Excel, donde se consolidó toda la información de acuerdo a lo necesitado.

Dentro de la información obtenida se encontraban datos de estaciones meteorológicas que habían sido suspendidas con fecha anterior al inicio de los datos históricos de fallas; por lo tanto, no se tuvieron en cuenta en el análisis ya que no permitían realizar relaciones directas entre las fallas y las condiciones meteorológicas.

### **5.3 Tratamiento**

Después de tener los datos limpios, tanto históricos de fallas como del clima, fue necesario unir ambas bases de datos con el fin de determinar el valor de la humedad relativa, precipitación, tensión de vapor, entre otros, según la hora de ocurrencia y localización de la falla, de tal forma que se usara los datos del clima más cercanos y resultara información más precisa.

Después de tener un solo archivo de MS Excel, se procedió a crear múltiples conjuntos de datos, de tal forma que se pudieran realizar análisis con diferentes variables y obtener diferentes resultados.

#### **5.4 Procesamiento**

Para procesar los conjuntos de datos resultantes, se utilizó la herramienta digital Weka versión 3.8.3, la cual brinda una colección de algoritmos de machine learning para el minado de datos. Contiene herramientas para preparación, clasificación regresión y visualización, entre otras (Waikato University, s.f.).

Teniendo en cuenta que el aprendizaje basado en arboles de decisión es ampliamente utilizado para crear modelos predictivos siempre y cuando se cuente con datos que sirvan para entrenar (Bhargava, Dayma, Kumar, & Singh, 2017), (Fessenden, 2016), (Jinglong, y otros, 2017); por lo tanto, se utilizó el algoritmo J48 de Weka para generar el árbol de decisión

## **6 VARIABLES**

### **6.1 Variables independientes**

Las variables de clima, considerando precipitaciones, humedad relativa y temperatura, son fenómenos que se presentan y no podemos forzarlos o evitarlos, es por esto que para la presente investigación, los consideraremos variables independientes y aunque muchos autores citan las tormentas y variaciones climáticas como causa de fallas eléctricas la asociación y correlación directa entre estas variables de clima y la incidencia de fallas eléctricas es lo que deseamos corroborar en la presente investigación, para el caso específico de la ciudad de Bogotá. El IDEAM cuenta con estaciones meteorológicas y registro de datos en las localidades de la ciudad, lo que nos permitirá consolidar un importante número de datos, los cuales mediante minería correlacionaremos con la información recibida por parte del operador de las fallas presentadas en los últimos años, para de esta correlación obtener tendencias y probabilidades que nos permitan establecer conclusiones. La totalidad de estas variables son del tipo cuantitativo.

**Precipitaciones:** Hace referencia a la cantidad de agua lluvia que cae en una zona determinada y se mide en mm de agua, con un instrumento llamado pluviómetro y equivale 1mm medido equivale a 1 lt de agua que cae por metro cuadrado.

**Humedad relativa:** Hace referencia a la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y es un porcentaje de la humedad de saturación.

**Temperatura:** Se registra en grados centígrados

## 6.2 Variables dependientes

Para la presente investigación tipificaremos como variables dependientes las causas de falla, y tipos de falla que ha determinado el operador ENEL. Estas variables son del tipo cualitativo y nos ajustaremos a los estándares establecidos para tipificar sus causas frecuentes de falla y agruparlas.

## 7 HIPÓTESIS

Analizando datos históricos climatológicos y de fallas en el sistema de distribución de energía eléctrica de Bogotá se puede generar un modelo predictivo de fallas.

## 8 RESULTADOS

Para dar cumplimiento a los objetivos trazados, se consolidaron diferentes bases de datos. La primera cuenta con 126.780 registros de históricos de fallas eléctricas de Enel Codensa, a la cual se le realiza una limpieza de datos. Inicialmente la misma contenía fallas asociadas a baja tensión y el presente estudio contempla el análisis de fallas de media tensión, esta fue la primer limpieza y recorte de datos. También se eliminaron registros de fallas ubicadas en lugares diferentes a Bogotá. Se pasó de tener 126.780 a 61.058 registros, de esta base de datos. Entre los parámetros representativos de esta base de datos se tienen: Fecha, inicio, tipo de incidencia, causa, zona, unidad operativa, subzona, subestación, circuito, clientes, minutos, observación, tipo, latitud, longitud.

Se corrigieron palabras como “transformador”, “conducto”, entre otras y homogenizaron términos entre “conductor” y “cable” o entre “terminal” y “terminales”, de

tal forma que permita la agrupación de fallas por motivos, en los casos anteriormente nombrados.

Los datos de fecha se encontraban una columna para año, otra para mes y otra para día, así que se unificó en una sola columna. Respecto a los campos de horas, se dividió las 24 horas del día en 12 rangos de horas con los cuales fueron clasificados los eventos de falla para agrupar los registros al momento de analizarlos y poder obtener información útil.

Para la solicitud de datos al IDEAM se contaba con un formato que incluía 29 parámetros hidroclimatológicos disponibles, de los cuales después de analizar, se seleccionaron únicamente 9, que se relacionan a continuación: precipitaciones totales, precipitación máxima, temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, brillo solar, velocidad y dirección del viento y vientos medios.

La información anterior fue solicitada para 51 estaciones, resultantes de un filtrado previo, puesto que el IDEAM cuenta con información de 8858 en todo el territorio colombiano. Los datos obtenidos del IDEAM fueron entregados en un fichero de texto plano que contenía información de múltiples estaciones meteorológicas de Bogotá, por lo cual fue necesario agrupar la información por estación, posteriormente se estableció formato apto para ser importado por el programa MS Excel, donde se consolidó toda la información de acuerdo a lo necesitado, se consolidaron inicialmente un total de 99.722 registros. Posteriormente se procede a la limpieza de dichos datos buscando seleccionar sólo aquellos que estuviesen georeferenciados cerca de las zonas de incidencia de CODENSA, finalmente la base de datos de IDEAM quedó con 39.295 registros.

De los datos de fallas, se relacionó el elemento eléctrico más cercano a la falla con las coordenadas geográficas del mismo, lo cual permitió asociarlo a la estación meteorológica más cercana y extraer la información de temperatura, velocidad del viento y precipitación, la proximidad se determinó mediante el cruce de información y haciendo comparaciones georeferenciadas con las ubicaciones, toda vez que se tenía latitud y longitud, tanto de las estaciones meteorológicas como del punto de falla.

Adicionalmente, se eliminaron columnas como número de incidencia, unidad operativa responsable, entre otras que no aportaban información útil, ya sea porque todos los registros contenían el mismo valor, o porque no me permitía agrupar la información de acuerdo al alcance del estudio.

Por último, en algunos registros se encontraron celdas vacías que, al no contener información, generaban perturbaciones al momento de agrupar los datos; por lo cual, dependiendo del tipo de información que debía contener, se completó con el valor promedio de todos los registros o se leyó las observaciones asociadas para obtener la información faltante. Cuando no se encontraba el dato buscado, se completó con el valor que mayor frecuencia se presentaba en los registros.

Al finalizar, se pasó de tener 36 columnas a tener conjuntos de datos en diferentes archivos de 5 columnas, puesto que las demás no ofrecían información relevante para el estudio.

## **9 DISCUSIÓN**

Después de ingresar los datos filtrados al programa Weka 3.8, utilizar el algoritmo J48 para realizar la clasificación por medio de árboles de decisión, se obtuvo que los resultados no fueron concluyentes ya que, a pesar de haberse generado un árbol de 4.752 hojas y de un tamaño de 8.822, el porcentaje de instancias correctamente clasificadas fueron de 47.03%, lo cual indica que el modelo no es confiable. Así mismo, el error que arroja el modelo construido es muy alto, alcanzando el 83.09% y teniendo valores de precisión muy bajos.

A pesar de tener 39.295 registros del IDEAM, solo se utilizó el parámetro temperatura puesto que la humedad relativa y el viento, como estaba planteado inicialmente, no fueron entregadas, o no con suficiente periodicidad para ni de las estaciones meteorológicas solicitadas, dejando a la temperatura como única variable.

**Figura 9.** Resumen resultado análisis Weka 3.8

|                                  |           |           |
|----------------------------------|-----------|-----------|
| Correctly Classified Instances   | 28720     | 47.0372 % |
| Incorrectly Classified Instances | 32338     | 52.9628 % |
| Kappa statistic                  | 0.2661    |           |
| Mean absolute error              | 0.0622    |           |
| Root mean squared error          | 0.189     |           |
| Relative absolute error          | 83.0913 % |           |
| Root relative squared error      | 97.736 %  |           |
| Total Number of Instances        | 61058     |           |

**Fuente.** Weka 3.8

Con estos valores se puede llegar a pensar que la variable meteorológica utilizada, la temperatura, no es consistente en los resultados de una falla eléctrica; sin embargo, es necesario realizar más pruebas con las otras variables y utilizar los valores lo más precisos posibles; ya que en algunos casos, no se contaba con el dato exacto de la estación más cercana o era necesario interpolar entre los valores de los días cercanos que si se tuviera información.

**Figura 10.** Fragmento del modelo generado

```
J48 pruned tree
-----

circuito = 2_AVENIDAS
| hora <= 8
| | hora <= 4: TRANSITORIA (3.0/1.0)
| | hora > 4: PROGRAMADO (9.0/3.0)
| hora > 8
| | hora <= 12: EQUIPOS (6.0/3.0)
| | hora > 12: TRANSITORIA (9.0/5.0)
circuito = 20_JULIO
| temperatura <= 17.2
| | hora <= 6: CONDUCTOR (4.0/2.0)
| | hora > 6: PROGRAMADO (18.0/7.0)
| temperatura > 17.2: TRANSITORIA (3.0)
circuito = 30_AGOSTO
| hora <= 12: PROGRAMADO (3.0/1.0)
| hora > 12: TRANSITORIA (2.0)
circuito = 4_ESQUINAS: PROGRAMADO (1.0)
circuito = 7_AGOSTO
| hora <= 10
| | hora <= 6
| | | hora <= 0
| | | | temperatura <= 18.2: BAJANTES (2.0/1.0)
| | | | temperatura > 18.2: ARBOLES (4.0/2.0)
| | | hora > 0: TRANSITORIA (34.0/19.0)
```

**Fuente.** Weka 3.8

## 10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A pesar que en el país existen las fuentes y herramientas para la consecución de información, como es el caso del IDEAM, la experiencia nos permitió evidenciar que la recopilación de la misma es engorrosa, implica surtir unos trámites y tarda un tiempo considerable obtener la información como se requiere. Se debe ser muy detallado en la periodicidad de los datos, atributos y estaciones. De lo contrario, no se tendrá la información necesaria para poder realizar el adecuado entrelazamiento de datos de tal forma que se pueda procesar dicha información para enriquecer el modelo y lograr adelantar las predicciones en lo referente a los posibles puntos y fallas, en función de las condiciones hidrometeorológicas.

Cuando se tienen bases de datos con grandes cantidades de registros, no es posible procesarlos ni analizarlos, con métodos convencionales ni haciendo uso de plantillas de Excel o similar, resulta imperioso el uso de procesos KDD y herramientas de minería de datos. Solo a través de técnicas y herramientas de análisis de datos se puede encontrar información útil que permita crear modelos para predecir eventos futuros basándonos en información de eventos ocurridos en el pasado; sin embargo, para que el análisis sea más preciso es necesario contar con grandes volúmenes de datos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se requieren más variables meteorológicas y que los datos sean más precisos y confiables para lograr un correcto análisis, puesto que a nivel interno de Enel codensa, las estadísticas corroboran que en temporada de lluvias y vientos se tiene incremento en el número de fallas en el sistema de distribución de energía y es una realidad que el IDEAM cuenta con la tecnología, sin embargo la forma como se está recopilando la información, las restricciones y demoras para su obtención, dificulta el cruce de datos para obtener un modelo confiable.

Esta investigación debe motivar a los involucrados para que articulen una alianza que permita hacer uso de la información que captura el IDEAM y la empresa privada se vincule para garantizar que esta información se recopile en la cantidad que permita nuevamente correr el presente modelo y corroborar lo que la experiencia y los resultados



de los operadores evidencian cuando las condiciones del clima empeoran, se incrementa las ocurrencias de falla en el sistema de distribución de energía en la ciudad de Bogotá.

## 11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afanador, E., Zapata, J. G., Nuñez, J., & Ramirez, R. (2013). *Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca*. Bogotá: Fedesarrollo.
- Banco Mundial. (2015). *Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita)*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/eg.use.elec.kh.pc>
- Bhargava, N., Dayma, S., Kumar, A., & Singh, P. (2017). An approach for classification using simple CART algorithm in WEKA. *2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 212-216.
- Bichpuriya, Y. K., Navalkar, P. V., & Soman, S. A. (22 de Nov de 2011). Benchmarking of reliability indices for electricity distribution utilities: approach and discussion. Stevenage: The Institution of Engineering & Technology. doi:<http://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2156/10.1049/cp.2011.0508>
- Biol, F. (2006). World energy prospects and challenges. *CESifo Forum*, 7(2), 3. Obtenido de <https://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2083/docview/217447340?accountid=34925>
- Burns & McDonnell. (2004). *Reliability: Beyond the Numbers*. Obtenido de <https://www.burnsmcd.com/~media/files/insightsnews/insights/tech-briefs/2004-issue-1/reliability-beyond-the-numbers/articlereliabilitybeyondthenumbers04.pdf>
- Caracol, R. (26 de 07 de 2017). *Mas de 200 fallas en el servicio de energía por cometas*. Obtenido de [https://caracol.com.co/emisora/2017/07/26/bogota/1501077292\\_075117.html](https://caracol.com.co/emisora/2017/07/26/bogota/1501077292_075117.html)
- Congreso de la República de Colombia. (11 de julio de 1994). Ley 142. Bogotá, D.C. Recuperado el 2019 de febrero de 03, de [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0142\\_1994.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0142_1994.html)
- Congreso de la República de Colombia. (06 de marzo de 2014). Ley 1712. Bogotá, D.C.

- Council of European Energy Regulators. (2018). *Energy Quality of Supply Work Stream*. Brussels: CEER. Obtenido de <https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/963153e6-2f42-78eb-22a4-06f1552dd34c>
- CREG. (28 de Mayo de 1998). Resolución 70. Bogotá.
- DANE. (2003). *Proyecciones de estudio de población*. Bogotá D.C.: DANE.
- Dirección Nacional de Planeación. (2018). *Diagnóstico de la calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia 2017*. Bogotá.
- Enel, G. (2 de Septiembre de 2016). Comunicado de prensa plan de mitigación de fallas para temporada de vientos. Bogotá, Colombia.
- Espino T., C. (2017). *Análisis predictivo: técnicas y modelos utilizados y aplicaciones del mismo - herramientas Open Source que permiten su uso*. Barcelona: Universitat Oberta de Catalunya.
- Ferro, G. (2012). *Estudio de fallas asimétricas*. Mar del plata: Universidad de mar del plata.
- Fessenden, R. T. (2016). Forecasting new hampshire power outages through the analysis of weather station observations. Available from ProQuest Dissertations & Theses A&I; SciTech Premium Collection. Retrieved from <https://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2083/docview/1814215491?accountid=34925>.
- Grupo Enel. (2017). *Boletín de Resultados - Septiembre 2017*. Bogotá: Grupo Enel. Recuperado el 19 de febrero de 2019, de [https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp%C3%B1ol/accionistas\\_e\\_inversionistas/distribuci%C3%B3n/informaci%C3%B3n\\_financiera/boletines\\_y\\_reportes\\_de\\_resultados\\_financieros\\_y\\_operativos/2017/Boletin-de-Resultados-Septiembre-2017.pdf](https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp%C3%B1ol/accionistas_e_inversionistas/distribuci%C3%B3n/informaci%C3%B3n_financiera/boletines_y_reportes_de_resultados_financieros_y_operativos/2017/Boletin-de-Resultados-Septiembre-2017.pdf)
- Grupo Enel. (2018). *Factsheet 3Q*. Bogotá: Grupo Enel. Recuperado el 19 de febrero de 2019, de [https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp%C3%B1ol/accionistas\\_e\\_inversionistas/distribuci%C3%B3n/informaci%C3%B3n\\_financiera/boletines\\_y\\_reportes\\_de\\_resultados\\_financieros\\_y\\_operativos/2018/Factsheet-3Q.pdf](https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp%C3%B1ol/accionistas_e_inversionistas/distribuci%C3%B3n/informaci%C3%B3n_financiera/boletines_y_reportes_de_resultados_financieros_y_operativos/2018/Factsheet-3Q.pdf)

- Ignatova, V., Villard, D., & Hypolite, J.-M. (2015). Simple Indicators for an effective Power Quality Monitoring and Analysis. doi:10.1109/EEEIC.2015.7165321
- Internacional Energy Agency. (2018). *Electricity Statistics*. Obtenido de <https://www.iea.org/statistics/electricity/>
- International Energy Agency. (2018). *Electricity Information*. Paris: IEA.
- International Energy Agency. (2018). *World Energy Outlook 2018*. Paris: IEA.
- Jamali, S., Bahman, A., & Bompard, E. (2017). *Fault location method for distribution networks using smart meters*. Elsevier.
- Jinglong, Z., Changzhan, H., Wu, X., Jiakun, A., He, C., & Jinglin, H. (2017). Research on Fault Prediction of Distribution Network Based on Large Data. *Les Ulis: EDP Sciences*.  
doi:http://bdbiblioteca.universidadean.edu.co:2156/10.1051/mateconf/20171390
- Maimon, O., & Rokach, L. (2010). *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. New York: Springer.
- MathWorks. (s.f.). *Análisis predictivo: Tres cosas que es necesario saber*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/discovery/predictive-analytics.html>
- Mora, J. J. (2006). *Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos de clasificación basados en el conocimiento*. Girona: Universitat de Girona.
- Ortiz, A. M., Afanador, E., Zapata, J. G., Núñez, J., Ramírez, R., Yepes, T., & Garzón, J. C. (2013). *Análisis de la situación energética de Bogotá y Cundinamarca*. FEDESARROLLO–EMPRESA DE ENERGÍA DE BOGOTÁ.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (25 de septiembre de 2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE. (30 de Agosto de 2013). *Resolución No.9 0708 de Agosto 30 de 2013*. Colombia.
- Resolución No. 015. (29 de enero de 2018). *Comisión de Regulación de Energía y Gas*. Bogotá, D.C. Recuperado el 2019 de febrero de 03, de [http://apollo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/\\$FILE/Creg015-2018.pdf](http://apollo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/$FILE/Creg015-2018.pdf)

- Robledo, O. (2000). Optimización del costo de mantenimiento de sistemas de distribución eléctrica: una aplicación a la función de distribución de Weibull. *Revista Universidad EAFIT: Vol. 36 Núm. 120*, 9-24.
- Sáenz, M. (2012). *Potencia Eléctrica : Radiografía de un sector modelo y estratégico en el mundo*. Bogotá: Publicaciones Semana.
- Superintendencia Delegada para Energía y Gas Combustible. (2018). *Diagnóstico de la Calidad del Servicio de Energía Eléctrica en Colombia 2017*. Bogotá D.C. Recuperado el 03 de febrero de 2019, de [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/diagnosticodecalidad2017\\_version\\_06072018\\_1.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/diagnosticodecalidad2017_version_06072018_1.pdf)
- UPME. (2016). *Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Minas.
- Waikato University. (s.f.). *Weka 3 - Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java*. Obtenido de <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>
- Yu, W., Li, B., Lei, Y., & Liu, M. (2011). Analysis of a residential building energy consumption demand model. *Energies*, 4(3), 475-487.