

Estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión en usuarios de tipo industrial conectados a sistemas de distribución de energía eléctrica utilizando registros reales de señales de tensión

Cristina Isabel Peinado Serrano

Trabajo de Grado para Optar el título de Magíster en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Director

Jairo Blanco Solano

Doctor en Ingeniería - Área Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Maestría en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Bucaramanga

2024

Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Pérdidas Económicas por Hundimientos de Tensión.....	9
1.1 Formulación del problema	9
1.2 Motivación y justificación	11
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo General.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Revisión de Literatura.....	13
2.1 Calidad de la Energía Eléctrica.....	14
2.1.1 Hundimientos de tensión.....	15
2.1.2 Causas de los hundimientos de tensión.....	16
2.1.3 Hundimientos de tensión en un sistema de distribución de energía eléctrica.....	17
2.1.4 Impactos técnicos y económicos.....	18
2.2 Estimación de pérdidas económicas por hundimientos de tensión.....	18
2.2.1 Procedimiento para la revisión de literatura	19
2.2.2 Métodos orientados a la estimación pérdidas económicas por hundimientos de tensión	21
2.2.2.1 Artículo: “Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology” (Milanovic & Gupta, 2006).....	21
2.2.2.2 Artículo: “Estimating economic impact of voltage sags” (Wang, Chen & Lie, 2004)....	22

2.2.2.3 Artículo: “Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions” (Jhan Yhee Chan & Milanovic, 2007).....	23
2.2.2.4 Artículo: “The influence of process equipment composition on financial losses due to voltage sags” (Gupta, Milanovic & Aung, 2004).	24
2.2.2.5 Artículo: “A method for estimating the frequency and cost of voltage sags” (Heine, et. al., 2002).	25
2.2.2.6 Artículo “El Costo de las Perturbaciones Eléctricas en Empresas Industriales y Empresas de Economía Digital” (Gómez & Quesada, 2010).....	26
2.2.3 Criterios de evaluación para la selección del método de estimación pérdidas económicas por hundimientos de tensión	29
3. Método para la Estimación de Pérdidas Económicas a Causa de Hundimientos de Tensión...	33
4. Análisis de Resultados	41
5. Conclusiones y recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	52

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Hundimiento de tensión.....	16
Figura 2. Numero de publicaciones por año de la revisión de literatura.	20
Figura 3. Método para la estimación de pérdidas económicas.	33
Figura 4. Interfaz gráfica medidor calidad de la potencia	34
Figura 5. Registro perturbaciones año 2022 en el medidor de calidad de la potencia.....	35
Figura 6. Distribución perturbaciones año 2022.....	36
Figura 7. Distribución mensual perturbaciones año 2022	37
Figura 8. Curva CBEMA ITIC hundimiento tensión año 2022.....	37
Figura 9. Caso 1 costo total anual hundimientos de tensión costo unitario método.....	43
Figura 10. Caso 1 costo total anual hundimientos de tensión costo unitario método vs costo unitario cliente.	44
Figura 11. Caso 2 costo total anual hundimientos de tensión con costo unitario método	45
Figura 12. Caso 2 costo total anual hundimientos de tensión costo unitario método vs costo unitario cliente.	46
Figura 13. Caso 2 costo total anual hundimientos de tensión con costo unitario método	47

Lista de Tablas

	Pág,
Tabla 1. Resumen de artículos que abordan la estimación de pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión.....	27
Tabla 2. Resultados evaluación cualitativa de los artículos que abordan la estimación de pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión	31
Tabla 3. Distribución de eventos según su severidad año 2022	36
Tabla 4. Costo unitario hundimiento de tensión por categoría de usuarios	39
Tabla 5. Cantidad y estimación de pérdidas económicas cliente año 2022 por causa de hundimientos de tensión	42
Tabla 6. Resumen casos analizados	48

Resumen

Título: Estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión en usuarios de tipo industrial conectados a sistemas de distribución de energía eléctrica utilizando registros reales de señales de tensión*

Autor: Cristina Peinado**

Palabras Clave: Compensación, económico, calidad energía, costo-beneficio, análisis económico, red de distribución, remuneración, regulación, metodología, hundimiento tensión, costo interrupción del servicio

Descripción:

Este trabajo de aplicación, titulado “Estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión en usuarios de tipo industrial conectados a sistemas de distribución de energía eléctrica utilizando registros de señales de tensión” tiene como objetivo principal implementar y aplicar un método de estimación de pérdidas económicas asociadas a la ocurrencia de hundimientos de tensión presentados en un usuario tipo industrial conectado al sistema de distribución de energía eléctrica utilizando registros de medidas de tensión. Los hundimientos o caídas de tensión son una disminución en el valor eficaz de la tensión entre 0,1 y 0,9 en p.u. que se presenta en un punto del sistema eléctrico durante 0,5 ciclos a 1 minuto. Se caracterizan por su duración y por la magnitud de la caída [11]. Según lo anterior, cada industria puede presentar un comportamiento diferente ante la ocurrencia de un hundimiento de tensión, lo cual dificulta plantear una metodología general para la estimación de pérdidas económicas, así como, establecer criterios regulatorios nacionales. Adicionalmente, dependiendo del método el tipo y cantidad de información de entrada puede variar, la cual para muchos escenarios resulta complejas de determinar ya que para esto se requiere de información puntual e histórica. Es por esto, que resulta importante contar con metodologías para la estimación de las pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión, información útil para el diagnóstico de los impactos en el sector productivo por problemas de calidad de la potencia. Para lo anterior, se realizará una revisión de la literatura para la identificación de metodologías de estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión en sistemas de media tensión de clientes tipo industrial conectados a sistemas de distribución. Se seleccionará un método a partir de la revisión de literatura considerando criterios de información necesaria para la aplicación, limitaciones del método y nivel de inversión. Se obtendrán medidas de tensión acorde con el método seleccionado registradas en un cliente tipo industrial de un sistema de distribución, se implementará el método seleccionado y finalmente se analizarán los resultados obtenidos del método de estimación de pérdidas económicas por hundimientos de tensión, comparando los resultados obtenidos con el costo real de la parada del proceso del cliente por este tipo de hundimientos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Maestría en sistemas de distribución de energía eléctrica Director Jairo Blanco Solano Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Eléctrica

Abstrac

Título: Estimation of Economic Losses Due to Voltage Sags in Industrial Users Connected to Electric Power Distribution Systems Using Real Voltage Signal Records*

Autor: Cristina Peinado**

Palabras Clave: Compensation, Economic, Power Quality, Cost-benefit, Economic Analysis, Distribution Network, Remuneration, Regulation, Methodology Voltage Sag, Customer Interruption Costs

Descripción:

This applied research work, titled "Estimation of Economic Losses Due to Voltage Sags in Industrial-Type Users Connected to Electric Power Distribution Systems Using Voltage Signal Records," has the main objective of implementing and applying a method for estimating the economic losses associated with voltage sags occurring in industrial-type users connected to the electric power distribution system using voltage measurement records. Voltage sags, or dips, are a decrease in the RMS (root mean square) value of the voltage between 0.1 and 0.9 per unit (p.u.) that occurs at a point in the electrical system for a duration of 0.5 cycles to 1 minute. They are characterized by their duration and the magnitude of the drop [11]. Based on this, each industry may exhibit different behavior when a voltage sag occurs, making it difficult to propose a general methodology for estimating economic losses, as well as to establish national regulatory criteria. Additionally, depending on the method, the type and amount of input information may vary, which, for many scenarios, is complex to determine, as it requires both real-time and historical data. Therefore, it is important to have methodologies for estimating the economic losses due to voltage sags, providing useful information for diagnosing the impacts on the productive sector caused by power quality issues. To this end, a literature review will be conducted to identify methodologies for estimating economic losses due to voltage sags in medium-voltage systems of industrial-type customers connected to distribution systems. A method will be selected based on the literature review, considering the necessary information for its application, method limitations, and required investment levels. Voltage measurements, in line with the chosen method, will be obtained from an industrial-type customer connected to a distribution system. The selected method will be implemented, and the results of the economic loss estimation due to voltage sags will be analyzed by comparing the obtained results with the actual cost of process downtime for the customer caused by these types of sags.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones Maestría en sistemas de distribución de energía eléctrica Director Jairo Blanco Solano Doctor en Ingeniería Área Ingeniería Eléctrica

Introducción

La continua evolución y actualización de los equipos utilizados para los diferentes procesos industriales presentan características electrónicas que resultan ser más sensibles a las fluctuaciones de tensión, las cuales pueden detener el equipo o los procesos de producción por periodos prolongados.

Los hundimientos de tensión son uno de los tantos fenómenos que se presentan en los sistemas eléctricos y pueden ocasionar diversos impactos sobre la industria. Dependiendo del tipo de hundimiento se pueden llegar a presentar pérdidas que se ven reflejadas en costos económicos de producción y materiales, como también existen otros que pueden no ser representativos.

En la estimación de pérdidas económicas por problemas en la calidad de la potencia intervienen factores como tipo de proceso afectado, tipo de equipos electrónicos que se utilizan, frecuencia y severidad de la perturbación, tipo de pérdidas (daño de equipos, detención de procesos, incumplimiento de contratos), y factores técnicos como distancia o ubicación del cliente en el circuito de alimentación y tensión de servicio. Lo anterior, hace que la estimación de las pérdidas económicas que percibe un usuario del sistema de distribución de un operador de red no sea fácil de determinar.

De acuerdo con lo mencionado, cada industria puede manifestar un comportamiento distinto frente a la ocurrencia de hundimientos de tensión, lo cual complica la formulación de un método general para la estimación de pérdidas económicas y la definición de criterios regulatorios nacionales. Por ello, es fundamental disponer de métodos que permitan evaluar el impacto de problemas de calidad de la potencia en el sistema eléctrico y sectores productivos. Contar con esta

información facilita a los actores del sistema eléctrico una mejor toma de decisiones operacionales, una planificación más eficaz del sistema eléctrico y una optimización de los procesos. Además, estos métodos promueven una mayor interactividad entre las empresas y sus clientes, al identificar riesgos potenciales de falla y proponer mitigaciones para reducir al máximo las pérdidas económicas. Este trabajo de aplicación implementa y evalúa un método para estimación de las pérdidas económicas asociadas a la ocurrencia de hundimientos de tensión, utilizando registros reales presentados en clientes de tipo industrial.

1. Pérdidas Económicas por Hundimientos de Tensión

Este capítulo aborda los objetivos, la formulación de problema, la motivación y la justificación de este trabajo de aplicación. Esto permite presentar el contexto del problema abordado, además de mostrar la relevancia y pertinencia de la estimación de las pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión, como información útil para el diagnóstico de los impactos en el sector productivo por problemas de calidad de la potencia.

1.1 Formulación del problema

Los hundimientos o caídas de tensión son una disminución en el valor eficaz de la tensión entre 0,1 y 0,9 en p.u. que se presenta en un punto del sistema eléctrico durante 0,5 ciclos a 1 minuto. Se caracterizan por su duración y por la magnitud de la caída (IEEE Std 1159-2019, 2019).

Según lo expuesto, cada industria puede mostrar un comportamiento distinto ante un hundimiento de tensión, lo que dificulta la formulación de un método general para estimar las pérdidas económicas y la definición de criterios regulatorios nacionales. Además, dependiendo del método utilizado, el tipo y la cantidad de información requerida para la aplicación pueden complicar la estimación de las pérdidas. Esto se debe a que, en muchos casos, determinar esta información resulta complejo, ya que se necesitan datos específicos e históricos.

El problema se establece cuando con la información recopilada por los equipos de medición en el sistema de distribución se pretende estimar el impacto en pérdidas económicas sobre los clientes ante la ocurrencia de los hundimientos de tensión. El problema puede entenderse como uno de tipo regresión, donde la calidad y cantidad de información de entrada al estimador de pérdidas económicas serán determinantes en que la información de salida tenga un bajo error en relación con las pérdidas reales en el cliente. Es por esto, que resulta importante contar con métodos para la estimación de las pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión, información útil para el diagnóstico de los impactos en el sector productivo por problemas de calidad de la potencia.

Para lo anterior, se realiza una revisión de la literatura para la identificación de métodos de estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión en sistemas de media tensión de clientes tipo industrial conectados a sistemas de distribución. Se selecciona un método a partir de la revisión de literatura considerando criterios de información necesaria para la aplicación, limitaciones del método y nivel de inversión. Se obtienen las medidas de tensión acorde con el método seleccionado registradas en un cliente tipo industrial de un sistema de distribución, se implementa el método seleccionado y finalmente se analizan los resultados obtenidos del método de estimación de pérdidas económicas por hundimientos de tensión, comparando los

resultados obtenidos con el costo real de la parada del proceso del cliente por este tipo de hundimientos.

1.2 Motivación y justificación

La calidad de la potencia es un componente necesario y útil para todos los participantes de la cadena de valor del sector eléctrico, ya que si las perturbaciones electromagnéticas no se encuentran dentro de los límites de operación nominal puede representar un alto impacto en la cadena de valor. Los hundimientos de tensión pueden llegar a afectar las producciones de una empresa y ocasionar pérdidas que se ven reflejadas en pérdidas económicas de producción y materiales. En los procesos industriales pueden presentarse otro tipo de perturbaciones que afectan la calidad de la potencia como las elevaciones de tensión, transitorios y flickers, pero para este trabajo se seleccionaron los hundimientos de tensión ya que según la revisión de literatura presentada en el capítulo 2, son estos los que han generado en mayor proporción problemas colaterales, tanto en la red eléctrica, como en los usuarios que lo conforman, generando sobrecostos para los clientes industriales.

Además, el avance en las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones juega un papel crucial, ya que permite disponer, ya sea en tiempo real o almacenada, de información detallada sobre las variables de calidad de la potencia. Esto facilita a los actores involucrados en el sistema eléctrico mejorar la toma de decisiones operacionales y optimizar la planificación de los procesos. Adicionalmente, aporta mayores niveles de interactividad de las empresas con los clientes de tipo industrial, al identificar posibles riesgos de falla y lograr proponer posibles mitigaciones en función de reducir al máximo las pérdidas económicas.

1.3 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos de este trabajo de aplicación:

1.3.1 Objetivo General

Implementar y evaluar un método de estimación de pérdidas económicas asociadas a la ocurrencia de hundimientos de tensión presentados en usuarios tipo industrial conectados a sistemas de distribución de energía eléctrica utilizando registros de medidas de tensión.

1.3.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión de literatura para la identificación de métodos de estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión en sistemas de baja y media tensión de clientes de tipo industrial conectados a sistemas de distribución.

Seleccionar un método a partir de la revisión de literatura considerando criterios del tipo de información necesaria para su aplicación, limitaciones del método y nivel de inversión requerido para su implementación.

Obtener y organizar las medidas de tensión registradas por un cliente de tipo industrial conectado a un sistema de distribución acorde con el método seleccionado, para una ventana de tiempo de un año.

Evaluar y analizar los resultados del método de estimación de pérdidas económicas por la ocurrencia hundimientos de tensión.

Los objetivos establecidos se han alcanzado de acuerdo con los resultados expuestos en los capítulos siguientes:

En el Capítulo 1, se presentan los objetivos, la formulación del problema, la motivación y la justificación de este trabajo de aplicación.

En el Capítulo 2, se describe un marco teórico con aspectos generales de calidad de la energía eléctrica. Asimismo, a partir de una revisión de literatura, se presentan los métodos empleados para la estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión. Con los resultados de esta revisión de literatura se realiza la selección de un método a implementar para la estimación de pérdidas económicas por hundimientos de tensión.

En el Capítulo 3, se presenta el método empleado para la estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión, describiendo la información necesaria para la aplicación del método.

En el Capítulo 4, se presentan los resultados y el análisis del método. Se determina el desempeño del método evaluando si la estimación del costo es adecuada para la ocurrencia de hundimientos de tensión en la red.

2. Revisión de Literatura

En este capítulo se describe la teoría básica para el desarrollo del proyecto, definiendo aspectos generales de calidad de la energía eléctrica. Asimismo, se presentan los métodos empleados para la estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de

tensión, incluyendo una explicación de los aspectos generales de su implementación, así como sus ventajas y desventajas. A partir de los métodos aquí expuestos, se selecciona el más adecuado para abordar la estimación de pérdidas económicas en el contexto del trabajo de aplicación.

2.1 Calidad de la Energía Eléctrica

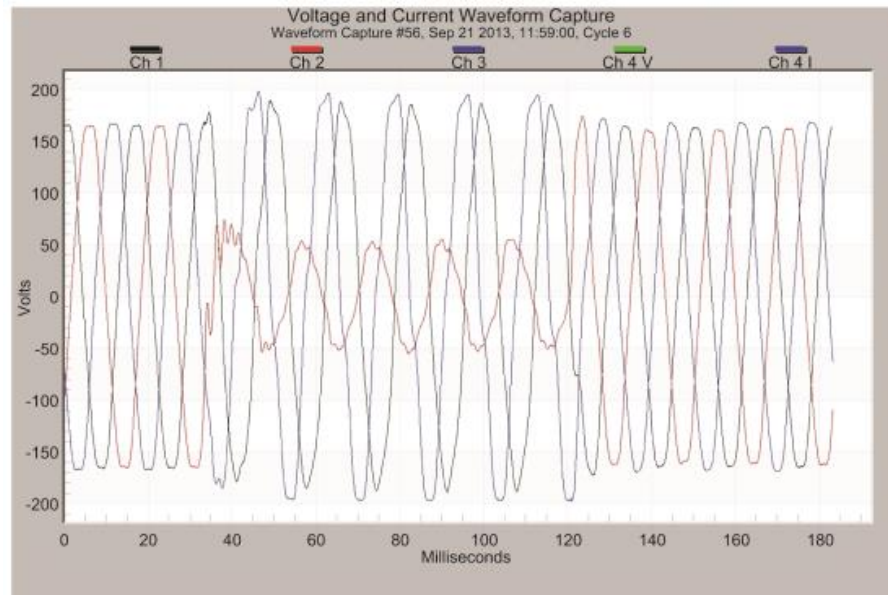
“La calidad de la energía eléctrica se define como el conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente de un sistema de potencia, para un tiempo y lugar determinados, que tienen el propósito de satisfacer las necesidades de los usuarios” (ICONTEC. 2008; IEC 61000-4-30, s.f.).

La función principal de un sistema eléctrico de potencia es abastecer a todos los usuarios de energía eléctrica, brindando un nivel aceptable de calidad, confiabilidad y seguridad. La calidad está relacionada con las desviaciones presentadas en las señales de tensión y/o corriente donde las características de forma de onda, amplitud y frecuencia permiten medir la confiabilidad y estabilidad del sistema, que garantizan la continuidad del servicio brindada a los usuarios finales (ICONTEC. 2008; IEC 61000-4-30, s.f.). Las perturbaciones que se presentan en el sistema son causadas principalmente por cargas no lineales, maniobras en el sistema, y descargas atmosféricas, que afectan la calidad de la energía. La presencia de estas perturbaciones durante la operación de los sistemas eléctricos hace que la calidad de la potencia eléctrica sea de interés para los participantes que integran la cadena del suministro. Adicionalmente, existe un principal problema de calidad de la energía y es el elevado impacto económico que genera la presencia de las perturbaciones en la cadena de suministro eléctrico, principalmente en usuarios finales.

Teniendo en cuenta lo anterior y en respuesta a la necesidad de cumplir con los indicadores de calidad de la energía establecidos en la normativa colombiana, nace la necesidad de generar y estudiar métodos para la estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión aplicados a puntos específicos de la red, donde el objetivo principal es lograr estimar los costos y pérdidas por las perturbaciones presentes en los sistemas de distribución, como hacer que las empresas del sector eléctrico impulsen y generen mecanismos que permitan garantizar la confiabilidad y calidad de la energía eléctrica ante los diversos escenarios de operación.

2.1.1 Hundimientos de tensión

Los hundimientos o caídas de tensión son una disminución en el valor eficaz de la tensión entre 0,1 y 0,9 en p.u. que se presenta en un punto del sistema eléctrico durante 0,5 ciclos a 1 minuto. Se caracterizan por su duración y por la magnitud de la caída (ver Figura 1) (IEEE Std 1159-2019; ICONTEC, 2008).

Figura 1.*Hundimiento de tensión*

Nota. Adaptado de IEEE Std 1159-2019 (2019) "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," *Revision of IEEE Std 1159-2009*, vol., no., pp. 1-98, 13 doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.

2.1.2 Causas de los hundimientos de tensión

Los cortocircuitos eléctricos o fallas en la red son la causa que tiene mayor frecuencia de ocurrencia y es considerada la principal fuente de generación de hundimientos de tensión, ya que la presencia de una falla implica la circulación de corrientes y por ende caídas de tensión significativas sobre las impedancias de red que hacen oscilar la tensión de operación normal a lo largo del sistema. Adicionalmente, existen otras causales con menor frecuencia de ocurrencia como lo son: las descargas atmosféricas, el arranque de motores de inducción, la energización de

grandes cargas y transformadores de distribución y potencia que causan caídas de tensión momentáneas (Heine, et. al., 2002; Gómez & Quesada, 2010).

2.1.3 Hundimientos de tensión en un sistema de distribución de energía eléctrica

Un sistema de distribución de energía eléctrica operando de forma “ideal” brinda a sus usuarios un suministro de energía eléctrica constante, con formas de onda de tensión, corriente y frecuencia que se encuentran dentro de los estándares regulatorios establecidos. Sin embargo, los sistemas eléctricos presentan diferentes características operativas que afectan la calidad de la potencia.

La calidad de la potencia es un componente necesario y útil para todos los participantes de la cadena de valor del sector eléctrico, ya que si las perturbaciones electromagnéticas no se encuentran dentro de los límites de operación nominal pueden representar un alto impacto en la cadena de valor. Los hundimientos de tensión pueden ocasionar daños severos en los elementos de la red, como afectar las producciones de una empresa y ocasionar pérdidas que se ven reflejadas en pérdidas económicas de producción y materiales.

En Colombia la calidad de la potencia no es regulada, a pesar de que la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) ha emitido normas como la resolución CREG 024 de 2005 modificada parcialmente por la resolución CREG 016 de 2007, (Comisión de Regulación de Energía y Gas. 2005; Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2007), donde se establece las condiciones técnicas que deben reunir los equipos de calidad de la potencia o unidades de adquisición de datos para la medición de los parámetros de calidad de la potencia, como el plan de sistema de medición-registro, los lineamientos que debe cumplir el operador de red respecto a

cada una de las variables que este debe reportar semanalmente a la CREG. Adicionalmente, existe un proyecto de resolución CREG 065 de 2012 (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2012) que pretende establecer las normas de calidad de la potencia aplicables en el Sistema Interconectado Nacional. Sin embargo, estas normas carecen de lineamientos para la estimación de las pérdidas económicas asociadas a los eventos de calidad de potencia de mayor probabilidad de ocurrencia, como lo son los hundimientos de tensión que representan un gran porcentaje de las pérdidas económicas de los clientes industriales.

2.1.4 Impactos técnicos y económicos

La presencia de hundimientos de tensión en un sistema eléctrico puede ocasionar interrupción de los procesos y pérdidas económicas significativas como costo de producción, materiales, mano de obra, etc. Las pérdidas pueden cuantificarse a partir de dos variables: sensibilidad del proceso a las perturbaciones del sistema eléctrico y la frecuencia de hundimientos de tensión. Lo cual, nace del supuesto de que algunos usuarios o tipos de industria son más sensibles a la perturbación. Por esto, se debe tener claro la forma en que se pretende corregir o atacar el problema para la reducción de la afectación económica (Heine, et. al. 2002).

2.2 Estimación de pérdidas económicas por hundimientos de tensión

Los problemas de calidad de potencia vienen generando impactos en los usuarios de energía eléctrica en varios países (Gómez & Quesada, 2010), así como en las empresas involucradas en la economía energética y la eficiencia de los recursos eléctricos. Se evidencia que

es de suma importancia mantener un equilibrio costo/beneficio de la energía para lograr sostener el desarrollo de nuevas tecnologías en la industria sin alterar al usuario final ni tampoco al operador de red. Es por eso, que este trabajo se enmarca en estimar las pérdidas económicas asociadas a la ocurrencia de hundimientos de tensión, utilizando registros reales presentados en clientes de tipo industrial.

A continuación, se presenta una revisión de literatura de las herramientas usadas para abordar el problema de la estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión y se describen los métodos seleccionados, resaltando en cada una de estas las variables de entrada, características del método, y resultados obtenidos de su aplicación.

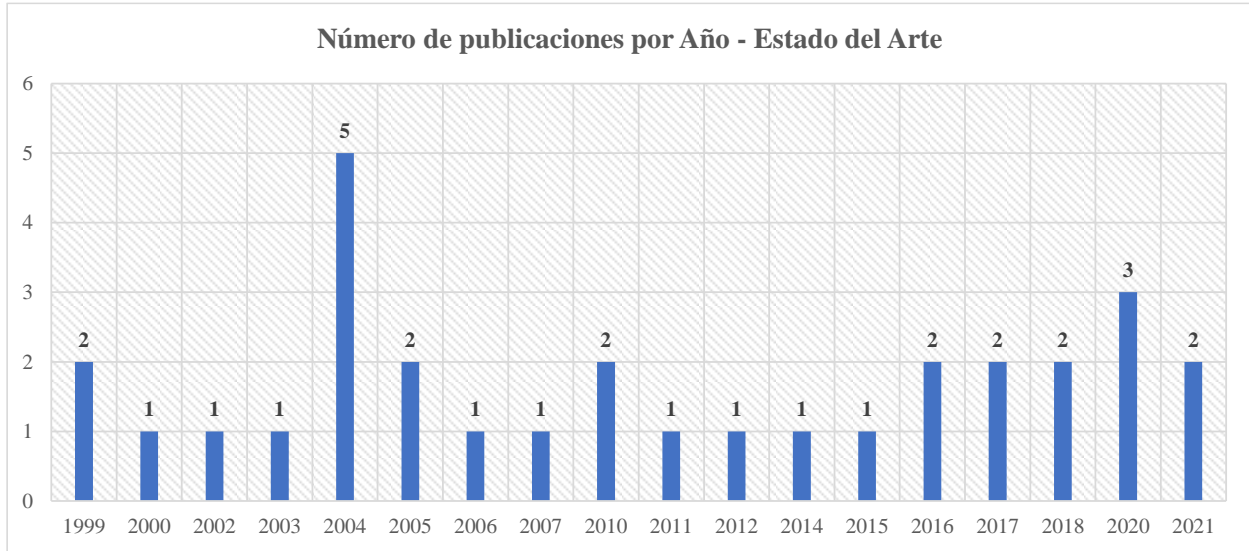
2.2.1 Procedimiento para la revisión de literatura

Para la revisión bibliográfica se realiza una búsqueda de artículos y documentación en las bases de datos con que cuenta la Universidad Industrial de Santander, usando palabras claves como “Compensation”, “Economic”, “Power Quality”, “Cost-benefit”, “Economic Analysis”, “Distribution Network”, “Remuneration”, “Regulation”, “Methodology Voltage Sag”, “Customer Interruption Costs” “Regulación de la calidad de la energía”.

La Figura 2 muestra la cantidad de artículos recopilados durante la revisión realizada, que abordan las pérdidas y costos económicos derivados de los hundimientos de tensión. En esta figura se destaca el número de publicaciones por año, ilustrando cómo el interés en este tema se ha mantenido constante a lo largo del tiempo, desde uno de los primeros artículos publicados en 1999.

Figura 2.

Numero de publicaciones por año de la revisión de literatura.



De la revisión realizada se seleccionan seis métodos con características alineadas con el objetivo general de este trabajo de aplicación. Para la selección de artículos, se eligieron aquellos que abordaban las pérdidas económicas en usuarios finales del tipo industrial, específicamente debido a paradas de procesos ocasionadas por hundimientos de tensión. Los métodos se identificaron en función de las siguientes características:

- Campos de aplicación del método de estimación de pérdidas económicas.
- Principios en los que se basa el método para la determinación de las pérdidas económicas.
- Variables o información de entrada necesarias.
- Información de salida o resultados que se obtienen al aplicar el método.

2.2.2 Métodos orientados a la estimación pérdidas económicas por hundimientos de tensión

A continuación, se presentan seis (6) métodos tomados de algunos artículos, incluyendo una explicación de los aspectos generales de su implementación.

2.2.2.1 Artículo: “Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology” (Milanovic & Gupta, 2006). El método de Milanovic & Gupta, (2006) está basado en la evaluación estocástica de las pérdidas económicas anuales por interrupciones y hundimientos de tensión. La evaluación de las pérdidas económicas debidas a hundimientos de tensión tiene en cuenta todas las incertidumbres asociadas a la cantidad y características de los hundimientos en una ubicación específica durante un tiempo predeterminado, la sensibilidad de los equipos conectados, cantidad e interconexión de los equipos del proceso industrial o comercial, la ubicación del proceso en la red y la información del costo promedio atribuido a una interrupción del proceso debido a la ocurrencia de un hundimientos.

Para la evaluación del impacto de los hundimientos en un punto particular de la red se requiere de tres pasos básicos: análisis de fallas, ocurrencia de hundimientos de tensión y análisis económico. El paso final para la evaluación económica requiere información adicional del comportamiento y consecuencia de las caídas de tensión esperadas durante el desempeño de los procesos industriales. Se deben comparar las caídas de tensión esperadas con la sensibilidad del equipo para determinar si este funcionará de manera deficiente, si superará los límites de magnitud y duración especificados en la ficha técnica, o si se activará un mecanismo de protección. Teniendo en cuenta lo anterior, se debe contar con la información de la sensibilidad de los equipos, la cual

puede obtenerse del fabricante del equipo o través de pruebas, la incertidumbre asociada a la sensibilidad del equipo y con el conteo de interrupciones o disparos del proceso.

En conclusión, el método está basado en un enfoque probabilístico que permite tener en cuenta la tendencia de actuación y sensibilidad de los equipos que participan del proceso.

2.2.2.2 Artículo: “Estimating economic impact of voltage sags” (Wang, Chen & Lie, 2004) El método propuesto en Wang, Chen, & Lie, (2004) se fundamenta en estudiar y evaluar el comportamiento que tiene el sistema o carga del cliente ante la ocurrencia de perturbaciones, en especial hundimientos de tensión, para lograr estimar los impactos técnicos y económicos.

Para la evaluación del impacto de los hundimientos de tensión, se deben tener en cuenta algunos aspectos claves: Características y comportamiento de los hundimientos, sensibilidad de los equipos del cliente, curva ITIC y SEMI F47, comportamiento de los equipos, relación y funcionamiento de los equipos y funcionamiento del sistema o carga. Para la estimación de las pérdidas económicas se hace uso del análisis del árbol de fallas. Una vez encontrada la relación entre el estado de funcionamiento de los equipos y un modo de falla específico, se puede establecer una función que refleje la sensibilidad de la carga a diferentes categorías de perturbaciones por hundimientos de tensión. Para cada modo de falla, se puede asignar una estimación económica, pero es necesario contar con la participación del personal de la empresa que tenga conocimiento de las pérdidas financieras asociadas con cada modo de falla.

En conclusión, la estimación se calcula a partir del comportamiento de los hundimientos de tensión que se presentan en el sistema y la tolerancia de los equipos. Demostrando que es posible correlacionar el comportamiento de los hundimientos de tensión en los equipos con el rendimiento del sistema o carga, lo que permite evaluar y estimar el impacto económico de este tipo de

perturbaciones. Sin embargo, a pesar de lo mencionado, no es posible identificar con precisión cuáles equipos presentan mayores tasas de fallas o son más vulnerables a los hundimientos de tensión. La frecuencia de las fallas en los diferentes equipos no siempre refleja el impacto negativo en el sistema o carga, ya que no todos los hundimientos de tensión tienen el mismo efecto. Por lo tanto, para establecer la relación entre el comportamiento de los equipos y el sistema, se debe aplicar un diagrama de bloques o realizar un análisis del árbol de fallas.

2.2.2.3 Artículo: “Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions” (Jhan Yhee Chan & Milanovic, 2007). En Jhan Yhee Chan, & Milanovic, (2007) se propone un método para estimar las pérdidas económicas por hundimientos de tensión en interrupciones de corta duración en plantas industriales basado en la evaluación de los riesgos de falla de equipos, subprocesos y procesos de una planta industrial. La parte principal es la evaluación del riesgo de falla de los equipos, donde se construye un modelo basado en lógica difusa que aborda las incertidumbres involucradas en el comportamiento y tolerancia del equipo por la ocurrencia o presencia de hundimientos de tensión e interrupciones de corta duración. Para el riesgo de falla a nivel de subproceso, se debe considerar la composición y relevancia de cada tipo de equipo que lo conforma. Por último, la evaluación del riesgo de falla de los procesos y de toda la planta industrial se basa en la técnica de árbol de fallas. La entrada fundamental para la aplicación del método son los datos de hundimientos de tensión que se presentaron en la planta. Adicionalmente, las salidas de cada nivel son usadas como las entradas para el siguiente nivel. El último nivel implica riesgo de falla en la planta y por ende pérdidas económicas.

La estimación de las pérdidas económicas de una planta industrial requiere información sobre las pérdidas económicas totales por la ocurrencia de un hundimiento. Entendiéndose por

pérdidas económicas totales cuando toda la planta industrial detiene su proceso debido al disparo de sus subprocesos y equipos como consecuencia de la ocurrencia de hundimientos de tensión e interrupciones de corta duración. Las perturbaciones de menor gravedad incurrirán únicamente en una fracción de la pérdida máxima, la cual está determinada por el riesgo de falla de la planta industrial a partir del modelo de evaluación de riesgos. Generalmente, la pérdida económica por este tipo de perturbaciones es directamente proporcional al riesgo de falla de la planta.

El método propuesto se basa en las pruebas realizadas a los equipos que conforman todos los niveles de la planta a evaluar, ocupándose de la incertidumbre a partir de la adopción de modelos de lógica difusa. Adicionalmente, el ajuste de los parámetros de entrada permite una flexibilidad para lograr adaptar el método a diferentes tipos de clientes industriales y comerciales.

2.2.2.4 Artículo: “The influence of process equipment composition on financial losses due to voltage sags” (Gupta, Milanovic & Aung, 2004). El método propuesto en Gupta, Milanovic & Aung, (2004) se basa en la combinación de la probabilidad de ocurrencia de los hundimientos de tensión y las curvas de tolerancia de los equipos electrónicos, para estimar las perturbaciones por los hundimientos de tensión que generan disparos en los diferentes equipos y paradas en los diferentes procesos. La evaluación del impacto de los hundimientos consiste en evidenciar el comportamiento de este tipo de perturbaciones para un punto particular del sistema o planta y lograr coordinar la respuesta de los equipos que lo conforman con tales hundimientos. Las entradas de aplicación del método son: clasificación de los hundimientos de tensión, evaluación de los hundimientos y sensibilidad de los equipos.

La evaluación de los hundimientos únicamente informa sobre el número esperado hundimientos de diferentes características. Algunos puntos pueden mostrar un rendimiento

deficiente en caso de hundimiento, mientras que otros pueden mostrar una calidad de energía muy alta. Sin embargo, los puntos que presentan un mejor comportamiento ante la ocurrencia de hundimientos de tensión pueden resultar en mayores pérdidas económicas, dependiendo de la sensibilidad del equipo y su composición en las instalaciones del cliente. El desempeño general de la calidad de la energía del sistema depende en última instancia de las pérdidas económicas totales reportadas y registradas por el cliente.

2.2.2.5 Artículo: “A method for estimating the frequency and cost of voltage sags” (Heine, et. al., 2002). El método propuesto en Heine, et. al., (2002) proporciona una estimación anual de los costos asociados a hundimientos de tensión en cinco empresas de distribución de Finlandia. Para la estimación es necesario conocer la frecuencia de hundimientos de tensión la cual se calculó aplicando el método de posiciones de falla, adicionalmente, se debe conocer el número de clientes en las empresas y el precio individual de un hundimiento de tensión. El costo de un solo hundimiento se tomó de una encuesta que se llevó a cabo en tres países nórdicos a mediados de los años 1990, el cual se derivó de las consecuencias económicas directas e indirectas reales ante la ocurrencia de un este tipo de perturbaciones. Finalmente, las consecuencias económicas se evaluaron multiplicando la frecuencia y el costo de las caídas por el número de clientes.

El método permite inicialmente realizar una estimación de la frecuencia de ocurrencia de este tipo de perturbaciones en sistemas de distribución de media tensión. Adicionalmente, el costo total anual de hundimientos de tensión permitió demostrar que los clientes industriales son uno de los grupos más valiosos desde el punto de vista financiero. Sin embargo, se encontró que a pesar de la baja cantidad de hundimientos de tensión que se presentan, los costos anuales calculados parecieron ser razonablemente altos, sobre todo para los clientes del sector industrial.

2.2.2.6 Artículo “El Costo de las Perturbaciones Eléctricas en Empresas Industriales y Empresas de Economía Digital” (Gómez & Quesada, 2010). El método desarrollado en Gómez & Quesada, (2010), pretende a través de un estudio obtener un estimado del costo directo por perturbaciones eléctricas que afectan la calidad de la energía en empresas industriales y empresas de economía digital. El estudio se basa en encuestas a diferentes empresas las cuales están enfocadas principalmente a preguntas de costos de operación y de mantenimiento.

Para la aplicación del método se deben seleccionar los sectores y empresas con mayor sensibilidad a las perturbaciones eléctricas, estudiar los efectos que tienen la continuidad del servicio y calidad de la energía sobre los sectores empresariales, formular las preguntas relacionadas a las implicaciones económicas que ocasionan las interrupciones y perturbaciones eléctricas a partir de los resultados obtenidos de las encuestas realizadas, y finalmente realizar el muestreo o clasificación del subconjunto a partir de la población seleccionada.

La estimación de pérdidas económicas para los diferentes sectores seleccionados se da con los resultados obtenidos de las encuestas realizadas, los cuales consideran: las pérdidas de producción, los costos variables como horas extras y costo de materiales, los costos adicionales como por ejemplo daño de equipos, costo de reinicio procesos, y los costos netos.

En conclusión, el estudio propuesto se basa en las experiencias individuales y colectivas de empresas pertenecientes a los sectores industrial y comercial, que permiten evidenciar y asociar un valor estimado de los costos directos promedio y acumulados que experimentan los diferentes sectores, y el impacto económico que finalmente representan las perturbaciones eléctricas, por los distintos fenómenos de calidad de la potencia.

Los métodos expuestos anteriormente pretenden estimar las pérdidas económicas por hundimientos de tensión, a partir de diferentes fuentes de información de entrada y métodos de

aplicación (probabilísticos o comportamientos propios del sistema y de los equipos conectados a este). De lo anterior, se puede concluir que la estimación de las pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión resulta ser subjetiva, ya que depende en gran medida de la información de entrada necesaria para su aplicación, como, por ejemplo, las curvas de sensibilidad de los equipos, frecuencia de ocurrencia de las perturbaciones, configuración de la red y equipos, tipo de fallas; y no todas las empresas industriales o clientes que hacen parte del sistema eléctrico cuentan con la información suficiente para lograr la aplicación del método. Adicionalmente, los métodos aquí mostrados permiten obtener el costo del servicio o las pérdidas financieras en las que se incurriría en caso de ocurrencia de un hundimiento lo cual no permitiría asegurar el abastecimiento de la demanda bajo términos técnicos y con viabilidad económica.

En la Tabla 1 se presenta el resumen de los seis (6) métodos expuestos en este capítulo, con las características alineadas con el objetivo general de este trabajo de aplicación.

Tabla 1.

Resumen de artículos que abordan la estimación de pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión.

Nombre Artículo / Características	Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology	Estimating economic impact of voltage sags	Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions	The influence of process equipment composition on financial losses due to voltage sags	A method for estimating the frequency and cost of voltage sags	El Costo de las Perturbaciones Eléctricas en Empresas Industriales y Empresas de Economía Digital
Campos de aplicación del método de estimación de pérdidas económicas	Sistema de baja y media tensión industriales	Sistema de baja tensión de industrias	Sistemas de baja tensión de pequeñas plantas industriales	Sistema de baja y media tensión industriales	Sistema de baja tensión de industrias y distribuidoras de electricidad (OR)	Sistemas de media y baja tensión de diferentes empresas industriales, (industrial,

Nombre Artículo / Características	Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology	Estimating economic impact of voltage sags	Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions	The influence of process equipment composition on financial losses due to voltage sags	A method for estimating the frequency and cost of voltage sags	El Costo de las Perturbaciones Eléctricas en Empresas Industriales y Empresas de Economía Digital
Principios en el que se basa el método para la estimación de las pérdidas económicas.	Está basada en la evaluación estocástica de las pérdidas económicas anuales por interrupciones y hundimientos de tensión	Enfoque sistemático, caracteriza los tipos de perturbación y obtiene una estadística de ocurrencia de las perturbaciones.	Evalúa el riesgo de falla de la planta, y el costo económico por perturbaciones de calidad de la potencia, como pérdidas económicas	Enfoque probabilístico, realiza evaluación estocástica por perturbaciones	Frecuencia de ocurrencia de SAGS y el costo de ocurrencia de estos	Estudio basado en encuestas a diferentes empresas las cuales están enfocadas principalmente a preguntas de costos de operación y de mantenimiento
Variables o información de entrada necesarias.	Sensibilidad de los equipos, conteo de interrupciones, configuración o conexión de los equipos	Sensibilidad y comportamiento de los equipos (Curvas ITIC y SEMI F47)	Caída de tensión, interrupción de corta duración de los procesos de una la planta de producción	Sensibilidad del equipo, número de interrupciones, tipo de configuración de los equipos	Frecuencia anual de ocurrencia de huecos de tensión, costo hundimientos por cliente, clasificación usuarios sistema eléctrico, número de usuarios	Selección de empresas, ampliación de encuesta, implicaciones económicas
Información de salida o resultados que se obtienen al aplicar el método.	Pérdidas financieras	Impacto económico y pérdida por cada equipo.	Pérdidas financieras	Pérdidas financieras	El costo aproximado de ocurrencia de huecos por usuario final	Información de costos por problemas en calidad de energía

2.2.3 Criterios de evaluación para la selección del método de estimación pérdidas económicas por hundimientos de tensión

Es importante anotar que la evaluación y selección del método se hace con la mejor información disponible acerca de los principios en los que se fundamenta la estimación de las pérdidas, la información de entrada y salida y otras características reportadas en la revisión de literatura que se reunió. La selección de un método depende de quien esté haciendo la evaluación y elección, sujeto a los posibles criterios que pueda formular y el peso utilizado para su ponderación.

A continuación, se presentan los criterios considerados para la selección del método, que se evalúan de forma cualitativa (ALTA, MEDIA, BAJA):

- Principio en el que se basa la estimación de las pérdidas económicas:

Este criterio evalúa la simplicidad o complejidad del principio en el que se basa la estimación de las pérdidas económicas. La evaluación cualitativa se realiza considerando la utilidad del método en función de su nivel de simplicidad o complejidad. Así, una calificación ALTA para un método indica que se basa en principios simples y con poca formulación matemática, lo que facilita su aplicación.

- Cantidad información de entrada requerida por el método:

Este criterio evalúa el número de entradas necesarias para aplicar el método. La evaluación cualitativa se realiza teniendo en cuenta la conveniencia de aplicar el método en función de la cantidad de información requerida. Así, una calificación ALTA para un método indica que requiere una cantidad baja de información de entrada, suficiente para obtener resultados con un buen grado de confiabilidad.

- Recopilación rápida y eficiente de los datos necesarios:

Este criterio evalúa si la información de entrada requerida por el método requiere consultas a expertos, recopilación de datos estadísticos, información técnica de los equipos, etc. La evaluación cualitativa se realiza teniendo en cuenta la conveniencia de aplicar el método en función de la facilidad para obtener la información necesaria. Así, una evaluación ALTA para un método indica que la información es fácil y rápida de obtener, que está disponible, y que no se requiere realizar consultas con expertos.

- Limitaciones o restricciones del método:

El criterio evalúa si el método presenta limitaciones o restricciones que podrían complicar su aplicación. La evaluación cualitativa se lleva a cabo considerando la conveniencia de aplicar el método, bajo el supuesto de que no existen limitaciones o restricciones. Así, una evaluación ALTA para un método indica que la cantidad de restricciones o limitaciones es alta.

A continuación, se presentan en la Tabla 2 los resultados de la evaluación cualitativa de los artículos que abordan la estimación de pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión:

Tabla 2.

Resultados evaluación cualitativa de los artículos que abordan la estimación de pérdidas económicas por la ocurrencia de hundimientos de tensión

		Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology	Estimating economic impact of voltage sags	Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions	The influence of process equipment composition on financial losses due to voltage sags	A method for estimating the frequency and cost of voltage sags	El Costo de las Perturbaciones Eléctricas en Empresas Industriales y Empresas de Economía Digital
Principio en el que se basa la estimación de las pérdidas económicas	ALTA					X	X
	MEDIA	X	X	X	X		
	BAJA						
Cantidad información de entrada requerida por el método	ALTA						
	MEDIA		X	X		X	X
	BAJA	X			X		
Recopilación rápida y eficiente de los datos necesarios	ALTA	x				X	
	MEDIA			X			X

		Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology	Estimating economic impact of voltage sags	Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions	The influence of process equipment composition on financial losses due to voltage sags	A method for estimating the frequency and cost of voltage sags	El Costo de las Perturbaciones Eléctricas en Empresas Industriales y Empresas de Economía Digital
	BAJA	X	X		X		
Limitaciones o restricciones del método	ALTA						
	MEDIA	X	X	X	X		X
	BAJA					X	

A partir del resultado de la evaluación, para este trabajo, se ha seleccionado el método de Pohjanheimo, Lehtonen y Lakervi (2002), titulado *A Method for Estimating the Frequency and Cost of Voltage Sags* (sección 2.2.2.5), debido a que ofrece un enfoque detallado para evaluar los impactos de los hundimientos de tensión en un cliente tipo industrial. Este método se seleccionó porque la estimación de las pérdidas económicas resultantes de estos hundimientos es relativamente sencilla en el contexto de este trabajo, dado que se dispone de datos suficientes sobre la frecuencia anual de ocurrencia de hundimientos de tensión, el tipo de cliente a evaluar y el costo aproximado de un hundimiento, obtenido a partir de las encuestas realizadas en Heine (2002).

3. Método para la Estimación de Pérdidas Económicas a Causa de Hundimientos de Tensión

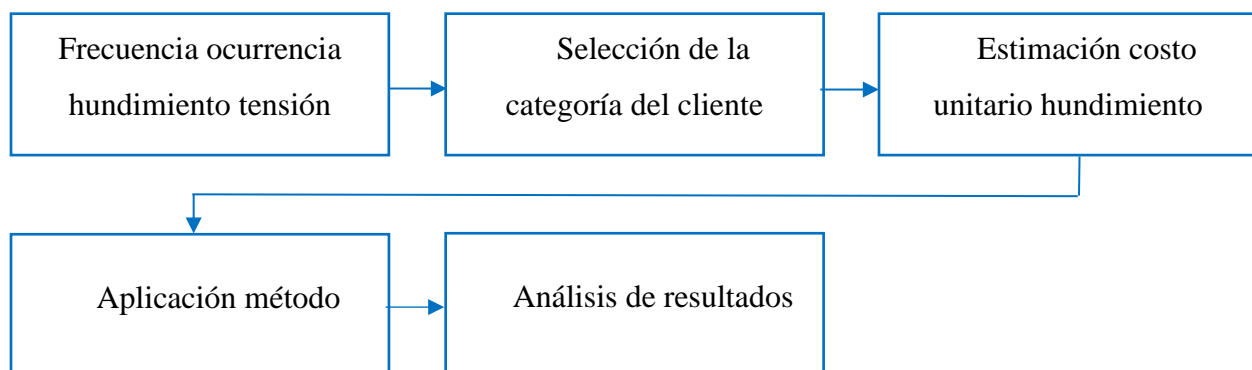
En este capítulo se describe el método empleado para la estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión.

De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 2, donde se presentan los métodos, y considerando los principios fundamentales de cada método para la determinación de las pérdidas económicas, así como las variables de entrada y la información de salida que se obtienen, es posible seleccionar el método de aplicación adecuado; y teniendo en cuenta los criterios de evaluación expuestos en la sección 2.2.3, para este trabajo, se ha seleccionado el método de Pohjanheimo, Lehtonen y Lakervi (2002), titulado *A Method for Estimating the Frequency and Cost of Voltage Sags* (sección 2.2.2.5),

La Figura 3 muestra los pasos a seguir para hacer la estimación de las pérdidas económicas. A continuación, se detallan los pasos:

Figura 3.

Método para la estimación de pérdidas económicas.



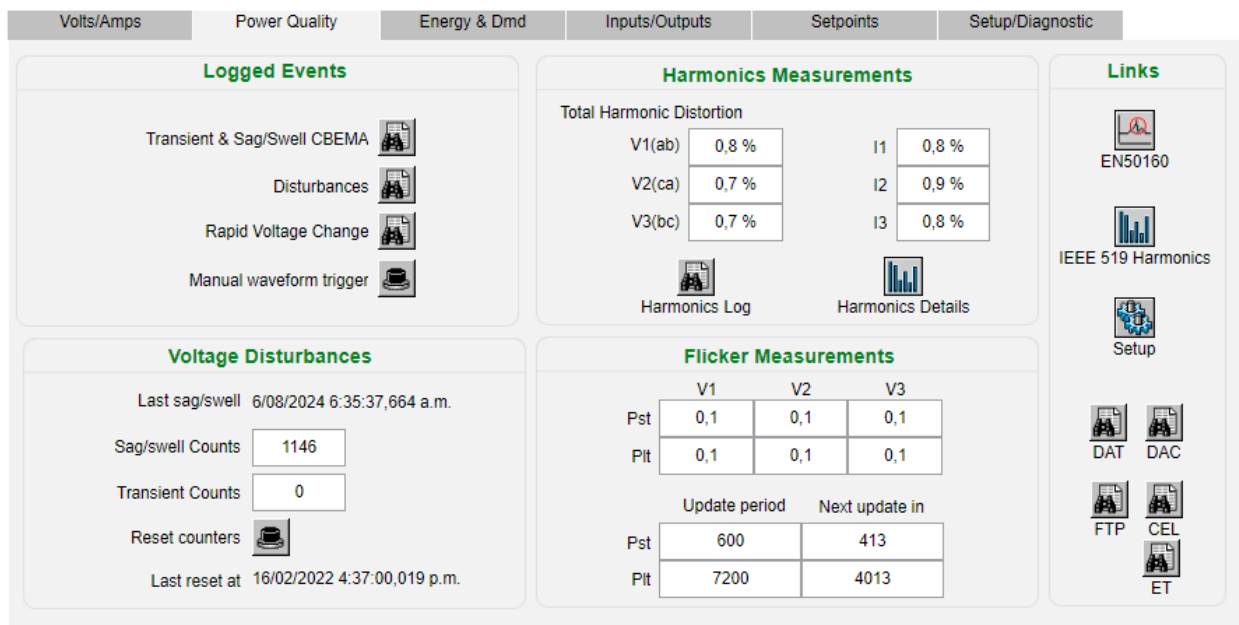
Frecuencia de ocurrencia de los hundimientos tensión

Aunque la frecuencia de los hundimientos de tensión en Heine (2002) se calculó utilizando el método de posiciones de falla, que se basa en un enfoque probabilístico y datos de confiabilidad de la red, en el contexto de este trabajo la información sobre la frecuencia de ocurrencia de los hundimientos proviene de datos reales.

Los analizadores de red conectados al sistema de distribución de los operados de red (según lo establecido en la regulación Creg 024 de 2005 y modificada por la Creg 016 de 2007) proveen los datos de los disturbios o perturbaciones presentadas por un periodo de tiempo, tomados del evento de tensión (Ver Figura 5). El valor de la perturbación que se obtiene corresponde al peor dato registrado durante el evento. En otras palabras, se refiere a la mayor desviación de la tensión con respecto al valor nominal.

Figura 4.

Interfaz gráfica medidor calidad de la potencia



Para la aplicación del método se utilizó la información de un cliente tipo industrial conectado al barraje de 34,5 kV, el cual cuenta con el registro histórico de las perturbaciones que ha percibido este alimentador. Teniendo en cuenta lo anterior, se cuenta con la información del año 2022 del medidor de calidad de la potencia.

Figura 5.

Registro perturbaciones año 2022 en el medidor de calidad de la potencia

1/01/2022 12:00:00 a.m. - 31/12/2022 11:59:00 p.m. (Server Local)

ID	Fecha	Tipo	Fase	Duración (s)	Magnitud(%)
1	3/01/2022 6:08:08 a.m.	Sag	V2	0,449	81,64
2	4/01/2022 5:44:23 a.m.	Sag	V3	0,175	73,36
3	10/01/2022 3:39:46 a.m.	Sag	V3	0,066	48,42
4	11/01/2022 5:51:19 a.m.	Sag	V2	0,275	82,82
5	11/01/2022 5:53:34 a.m.	Transient	V2	0,000065	146,00
6	12/01/2022 10:18:43 a.m.	Sag	V3	0,009	87,27
7	18/01/2022 6:50:55 a.m.	Sag	V1	0,114	86,89
8	21/01/2022 9:49:31 a.m.	Sag	V2	0,074	89,91
9	21/01/2022 9:13:33 p.m.	Sag	V2	0,033	85,90
10	24/01/2022 2:42:49 p.m.	Sag	V1	0,016	89,54
11	26/01/2022 10:55:25 a.m.	Sag	V1	0,093	39,16
12	27/01/2022 6:06:59 a.m.	Sag	V3	0,042	84,26
13	28/01/2022 12:18:06 p.m.	Sag	V2	0,033	88,80
14	29/01/2022 7:01:58 a.m.	Sag	V2	0,074	43,93
15	30/01/2022 5:05:22 p.m.	Sag	V2	0,333	39,63
	⋮				

La información de las medidas se organiza teniendo en cuenta únicamente las perturbaciones tipo “Sag”. A partir de ello, se realiza un análisis de hundimientos de tensión para el año 2022.

- Distribución de eventos según su severidad.

De las perturbaciones obtenidas en el medidor para el año 2022 se evidencia que:

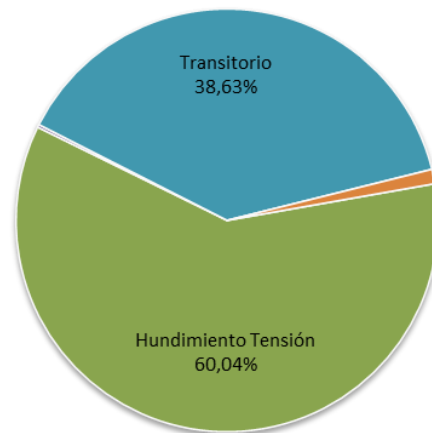
Tabla 3.

Distribución de eventos según su severidad año 2022

Total datos		453	
<i>Tipo de eventos</i>	<i>Nro disturbios</i>	<i>%</i>	
Subtensión	0	0,00%	
Elevación Tensión	0	0,00%	
Hundimiento Tensión	272	60,04%	
Sobretensión	1	0,22%	
Transitorio	175	38,63%	
Interrupción	5	1,10%	

Figura 6.

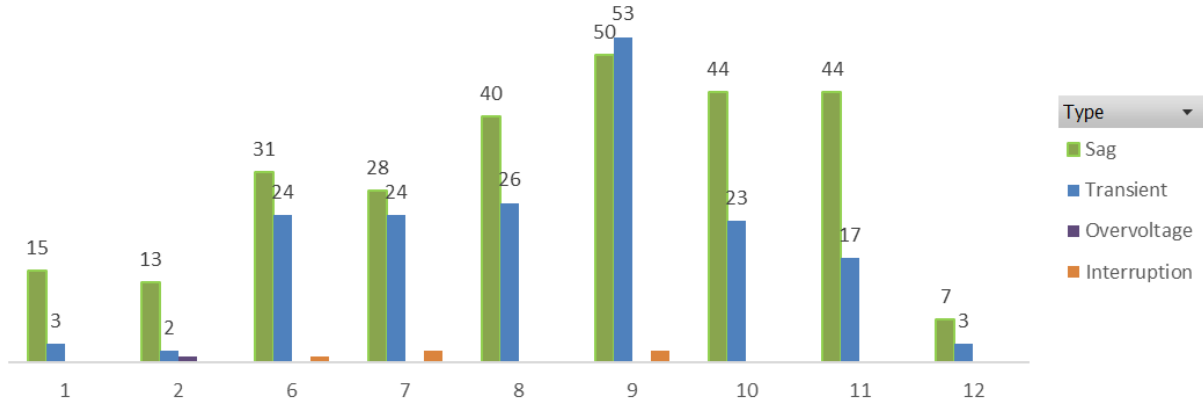
Distribución perturbaciones año 2022.



De lo anterior, se concluye que el 60% de los eventos corresponden a hundimientos de tensión registrados por el medidor. Adicionalmente, se relacionan la distribución de los eventos por mes:

Figura 7.

Distribución mensual perturbaciones año 2022

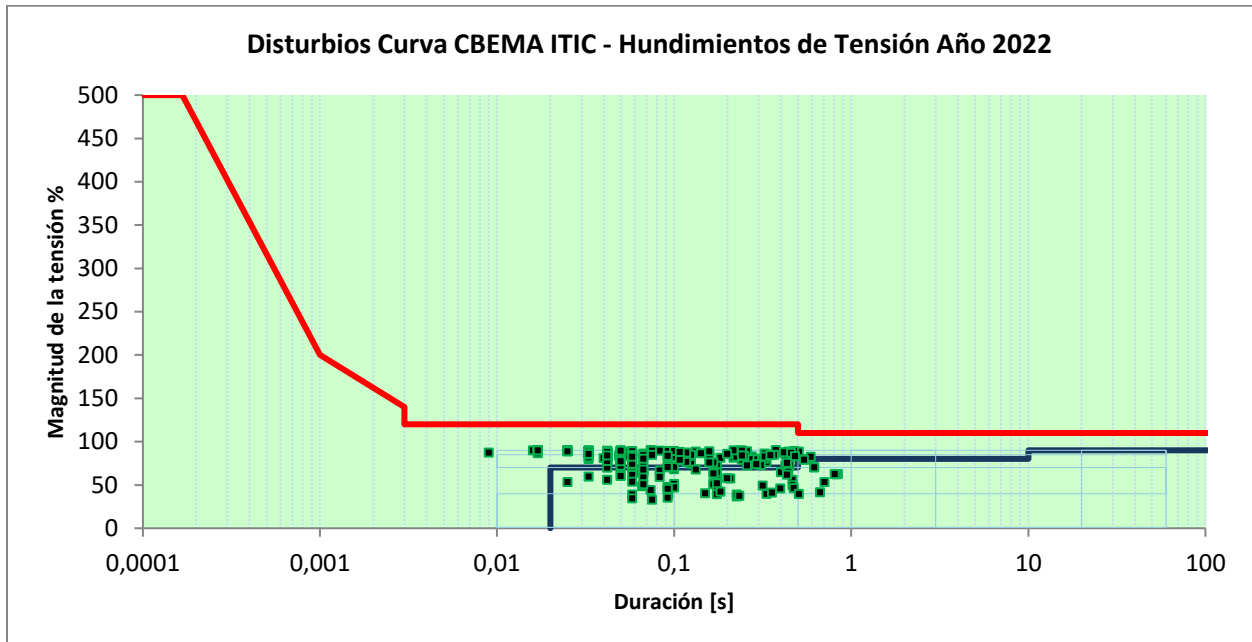


La mayor cantidad de hundimiento de tensión se presentaron entre agosto y noviembre.

- Curva CBEMA ITIC perturbaciones tipo hundimiento tensión año 2022

Figura 8.

Curva CBEMA ITIC hundimiento tensión año 2022.



Se clasificaron la severidad de los disturbios tipo hundimientos de tensión, identificando que, si bien la mayoría de los eventos están dentro de la zona de operación posible, la mayoría tienen una larga duración. Adicionalmente, existieron perturbaciones en la zona de no operación posible. Ambos casos pueden generar que los equipos conectados tiendan a perder continuidad operacional, se presentan reinicios, pérdida de información y productividad. Sin embargo, los equipos no se dañan y pueden continuar funcionando normalmente.

Selección de la categoría del cliente

Se debe seleccionar la categoría a la cual pertenece el cliente al que se le aplicará el método para estimar o conocer el costo de un hundimiento de tensión. Para este trabajo de aplicación la categoría corresponde a un solo cliente industrial.

Costo unitario por hundimiento de tensión

Para el costo de un único hundimiento de tensión se tiene en cuenta lo establecido en Heine (2002). Esta información fue estimada a partir de encuestas llevadas a cabo en tres países nórdicos a mediados de la década de 1990, apreciada en euros y clasificada por tipos de usuarios (Ver Tabla 4). En esta encuesta, se pidió a los clientes industriales que estimaran el costo que generalmente asumen debido a interrupciones en el proceso causadas por hundimientos de tensión, considerando tanto los costos directos como los indirectos. Además, se les consultó sobre la pérdida económica total anual que su empresa experimenta debido a estos eventos.

Sin embargo, para obtener un modelo detallado del tipo de encuesta que se puede realizar para estimar los costos directos de las perturbaciones eléctricas, en Gómez & Quesada, (2010) se presenta un estudio dirigido a una muestra representativa de consumidores en sectores claves, que analiza los costos que experimentan debido perturbaciones de calidad de la energía.

Tabla 4.*Costo unitario hundimiento de tensión por categoría de usuarios*

Categoría Usuarios	Costo Unitario Hundimiento Tensión (€)
Doméstico	1
Agricultor	1
Industrial	1.060
Comercial	170
Publico	130

Para la aplicación de este método se tiene en cuenta la categoría de cliente tipo industrial. Dado que el valor estimado en Jhan Yhee Chan, & Milanovic, (2007) corresponde al año 1995, se debe obtener el valor equivalente en poder adquisitivo entre 1995 y 2022. Para esto se aplicará la siguiente formula:

$$Valor_{2022-euro} = Valor_{1995} \times \frac{IPC_{2022}}{IPC_{1995}} \quad \text{Ecuación SEQ Ecuación * ARABIC 1}$$

Donde, $Valor_{1995}$ es el valor de un hundimiento de tensión para un cliente en 1995, IPC_{1995} el Índice de Precios al Consumidor en 1995 y IPC_{2022} el Índice de Precios de al Consumidor en 2022. Si bien el Índice de Precios de Producción (IPP) mide los cambios de precio desde la perspectiva del productor, contemplando áreas de producción industriales, de materias primas y de etapa de procesamiento, resulta siendo un indicador principal de inflación del consumidor. Por lo cual, la equivalencia a valor presente se hace a partir de la referencia de los valores de Índice de Precios al Consumidor (IPC) en la unión europea, valores tomados de Dinero en el Tiempo. (s.f.).

Considerando que el valor de 2022 está expresado en euros, se convierte a pesos colombianos utilizando la tasa de cambio del cierre del año 2022.

*Valor*_{2022-pesos}

$$= \frac{\text{Valor}_{2022\text{-euro}} \times \text{tasa de cambio}_{2022}}{1} \quad \text{Ecuación SEQ Ecuación \}$$

* ARABIC 2

Finalmente, el *Valor*_{2022-pesos} corresponde al precio de un hundimiento de tensión en el año 2022 para la categoría que sea seleccionada, para el objeto de este trabajo de aplicación el cliente estaría en la categoría industrial.

Cálculo de pérdidas económicas

La estimación de las pérdidas económicas totales se da multiplicando la frecuencia y el costo de las caídas por el número de clientes.

$$\text{Costo total} = \text{Cantidad Hundimientos} \times \text{Número Clientes}$$

$$\times \text{Valor}_{2022} \quad \text{Ecuación SEQ Ecuación \} * \text{ARABIC 3}$$

Por otra parte, cada industria puede presentar un comportamiento diferente ante la ocurrencia de un hundimiento de tensión, lo que dificulta plantear un método general para la estimación de pérdidas económicas. Por ende, no existiría un método con el cual comparar. En este sentido, la aplicación de este método busca demostrar que es posible analizar cualquier proceso industrial, estableciendo así un modelo o un precedente de un método con potencial de aplicación en Colombia. Teniendo en cuenta lo anterior, se contempla la información relacionada en los requerimientos o quejas enviadas mensualmente por el cliente industrial de las perturbaciones de calidad de la potencia que percibió su medidor en el punto de conexión, como fuente de comparación para el método aplicado.

4. Análisis de Resultados

En este capítulo se describe el resultado de la aplicación del método seleccionado para la estimación de pérdidas económicas ante la ocurrencia de hundimientos de tensión en un usuario tipo industrial.

Dado que el cliente se encuentra en la categoría industrial, se calculó el costo unitario de los hundimientos de tensión según lo establecido por la Ecuación 1 y la Ecuación 2.

$$Valor_{2022-euro} = 1.060 \times \frac{116,04}{62,64} = 1.963 \text{ €} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Valor_{2022-pesos} = \frac{1.963 \times 5126,51}{1}$$

$$= \$ 10'066.619 \quad \text{Ecuación SEQ Ecuación * ARABIC 5}$$

Finalmente, el precio de un hundimiento de tensión para la categoría industrial en el año 2022 es de \$ 10'066.619.

Por otro lado, según lo expuesto en el Capítulo 3, para comparar los resultados del método implementado se considera la información de campo proporcionada por la industria sobre sus propias estimaciones de pérdidas económicas para el año 2022. Los costos estimados por el cliente incluyen la harina no producida, el consumo de ACPM de la planta eléctrica y el recambio de repuestos o daños en los equipos. Con base en esta información, el cliente calcula las pérdidas totales considerando el valor de la harina dejada de facturar, la utilidad de la harina no producida, el costo del consumo de ACPM y el costo del recambio de repuestos y daños en equipos.

La Tabla 5 presenta la información de la estimación de las pérdidas económicas remitidas por el cliente.

Tabla 5.

Cantidad y estimación de pérdidas económicas cliente año 2022 por causa de hundimientos de tensión

Mes	Cantidad de Hundimiento Tensión	Costo Hundimientos Tensión (\$)
Enero	2	\$ 5.554.343
Febrero	4	\$ 18.980.022
Marzo	8	\$ 81.130.782
Abril	5	\$ 23.175.012
Mayo	2	\$ 7.454.297
Junio	2	\$ 32.504.694
Julio	9	\$ 86.174.282
Agosto	10	\$ 126.809.397
Septiembre	13	\$ 110.151.490
Octubre	8	\$ 46.676.618
Noviembre	5	\$ 64.350.400
Diciembre	5	\$ 2.778.897
Total general	73	\$ 605.740.232

De acuerdo con lo anterior, el costo total por la ocurrencia de los 73 hundimientos de tensión durante el año 2022 fue de **\$605.740.232**. Esto implica que, en promedio, el costo en el 2022 por cada hundimiento de tensión es de **\$8.297.811**.

Cabe aclarar que, el cliente no experimentó todos los hundimientos de tensión registrados en el medidor ubicado en la cabecera del circuito; los registros del medidor en el punto de conexión del cliente indicaron únicamente 73 hundimientos de tensión que provocaron la detención de sus procesos.

Caso 1

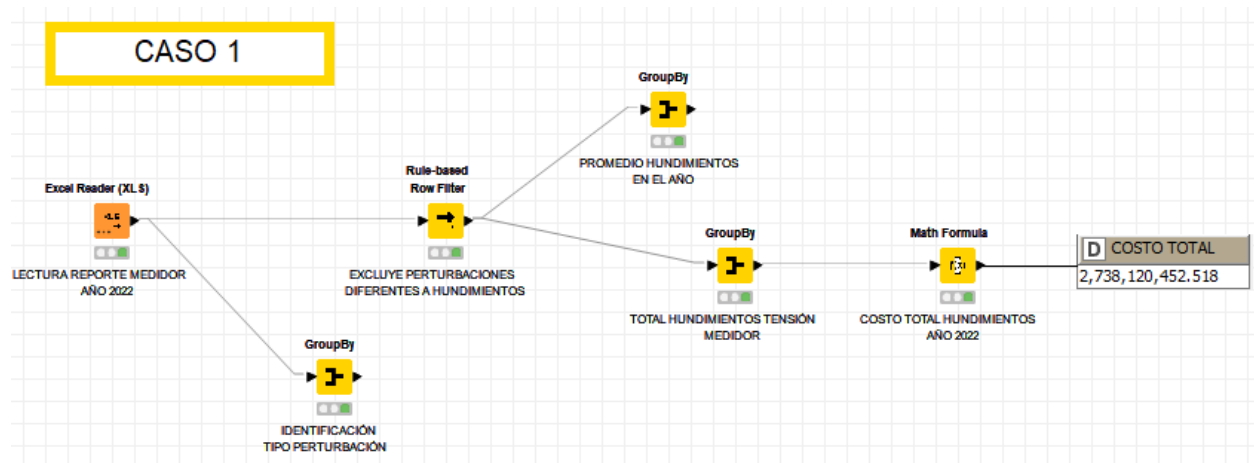
Para el Caso 1, se evaluó el costo asociado a la cantidad total de hundimientos de tensión registrada por el medidor de calidad de potencia en la barra de 34,5 kV. La información indica que

los eventos desde cabecera afectaron directamente la operación del cliente, por lo cual, este costo debería ser reconocido.

Para calcular este costo, se multiplicó el número de clientes afectados (en este caso, un solo cliente) por el precio de un hundimiento de tensión para la categoría industrial en el año 2022 (Ver Ecuación 4), y se considera la frecuencia de los 272 hundimientos (Ver Tabla 2). El resultado es el costo total anual derivado de los hundimientos de tensión según lo expuesto en la Ecuación SEQ Ecuación * ARABIC 3.

Figura 9.

Caso 1 costo total anual hundimientos de tensión costo unitario método



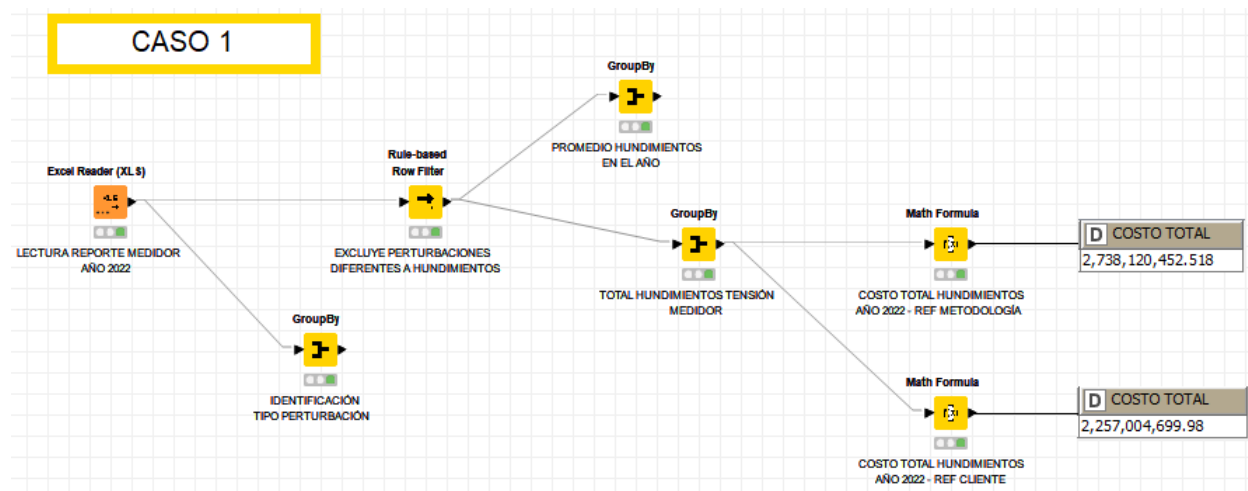
De la Figura 9, se concluye que el costo total asociado a la ocurrencia de 272 hundimientos de tensión durante año 2022 es de \$2'738.120.452.

Sin embargo, el costo promedio por hundimiento de tensión para el 2022 estimado por el cliente fue de \$8.297.811, por lo cual se calcula el costo total asociado a la ocurrencia de 272 hundimientos de tensión durante año 2022 multiplicando el número de clientes afectados (en este caso, un solo cliente) por el precio de un hundimiento de tensión estimado por el cliente para la

categoría industrial en el año 2022 (Ver Tabla 4), y se considera la frecuencia de los 272 hundimientos (Ver Tabla 2). El resultado es el costo total anual derivado de los hundimientos de tensión según lo expuesto en la Ecuación SEQ Ecuación * ARABIC 3. Así, al obtener este valor se comparan los resultados con el método implementado.

Figura 10.

Caso 1 costo total anual hundimientos de tensión costo unitario método vs costo unitario cliente.



De la Figura 10 se concluye que el costo total asociado a la ocurrencia de 272 hundimientos de tensión durante año 2022 es de \$2'257.044.699.

La diferencia entre el costo total calculado con el método y el costo total estimado con los datos de referencia del cliente es de \$481'075,752.

Caso 2

Para el Caso 2, se cruzaron los registros del medidor en el punto de conexión del cliente con los registros del medidor de calidad de la potencia en la barra de 34,5 kV. La información

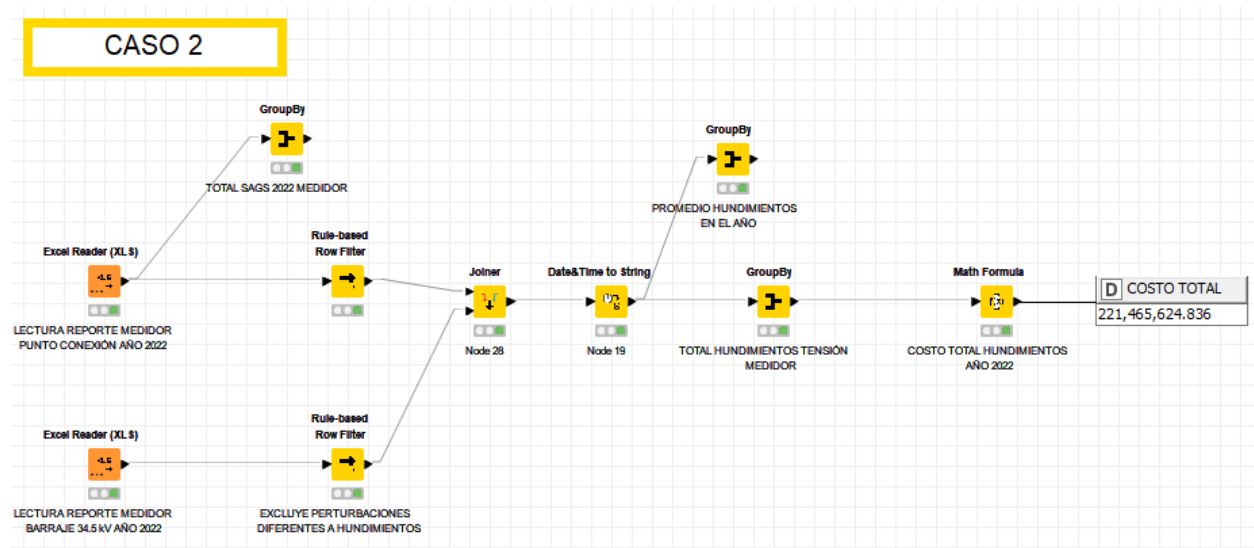
coincidente indica que los eventos desde cabecera afectaron directamente la operación del cliente, por lo cual, este costo debería ser reconocido.

Para calcular este costo, se multiplicó el número de clientes afectados (en este caso, un solo cliente) por el precio de un hundimiento de tensión para la categoría industrial en el año 2022 (Ver Ecuación 4), y se considera la frecuencia de los 22 hundimientos. El resultado es el costo total anual derivado de los hundimientos de tensión según lo expuesto en la Ecuación SEQ Ecuación * ARABIC 3.

De la Figura 11, se concluye que el costo total asociado a la ocurrencia de 22 hundimientos de tensión que ambos medidores registraron durante el año 2022 es de \$221'465.624.

Figura 11.

Caso 2 costo total anual hundimientos de tensión con costo unitario método

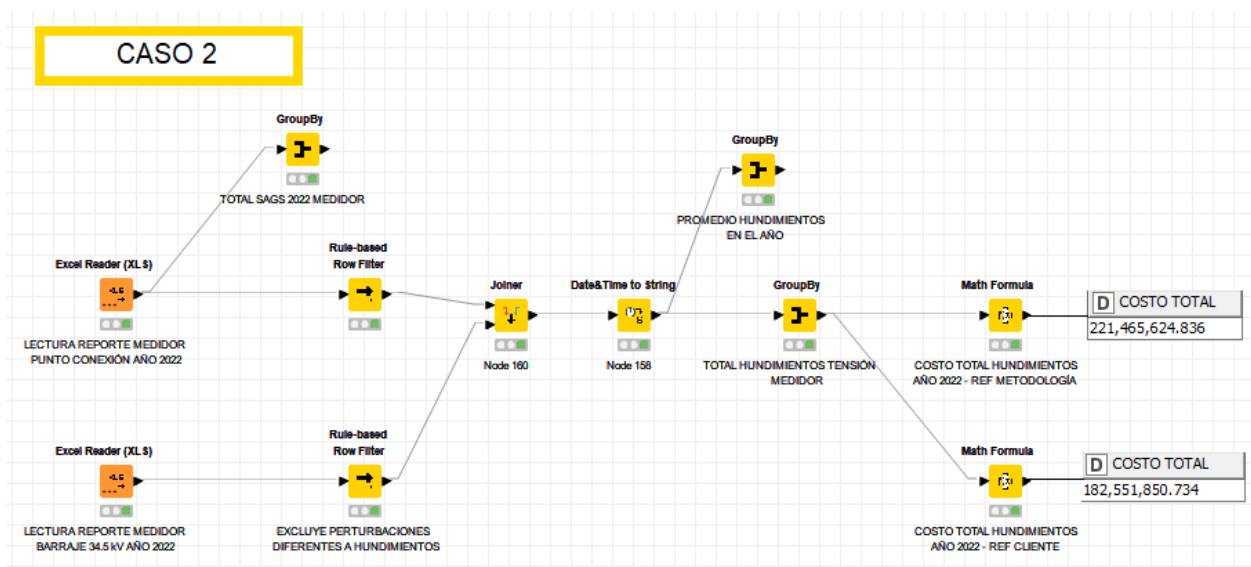


Sin embargo, el costo promedio por hundimiento de tensión para el 2022 estimado por el cliente fue de \$8.297.811, por lo cual se calculó el costo total asociado a la ocurrencia de 22

hundimientos de tensión durante año 2022 multiplicando el número de clientes afectados (en este caso, un solo cliente) por el precio de un hundimiento de tensión estimado por el cliente para la categoría industrial en el año 2022 (Ver Tabla 4), y se considera la frecuencia de los 22 hundimientos. El resultado es el costo total anual derivado de los hundimientos de tensión según lo expuesto en la Ecuación SEQ Ecuación * ARABIC 3. Así, al obtener este valor se pueden comparar los resultados con el método implementado.

Figura 12.

Caso 2 costo total anual hundimientos de tensión costo unitario método vs costo unitario cliente.



De la Figura 12 se concluye que el costo total asociado a la ocurrencia de 272 hundimientos de tensión durante año 2022 es de \$182'551.850.

La diferencia entre el costo total calculado con el método y el costo total estimado por con los datos de referencia del cliente es de \$38'.913.774.

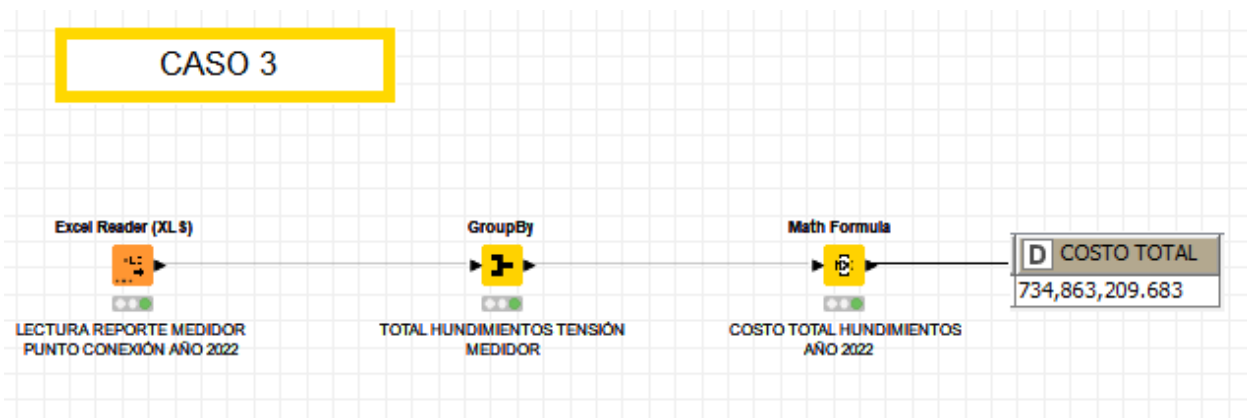
Caso 3

Para el Caso 1, se evaluó el costo asociado a la cantidad total de hundimientos de tensión registrados por el medidor en el punto de conexión del cliente a partir del costo unitario. La información indica que los eventos percibidos por el usuario también se presentaron en la cabecera del circuito y afectaron directamente la operación del cliente, por lo cual, este costo debería ser reconocido.

Para calcular este costo, se multiplicó el número de clientes afectados (en este caso, un solo cliente) por el precio de un hundimiento de tensión para la categoría industrial en el año 2022 (Ver Ecuación 4), y se considera la frecuencia de los 73 hundimientos. El resultado es el costo total anual derivado de los hundimientos de tensión según lo expuesto en la Ecuación SEQ Ecuación * ARABIC 3.

Figura 13.

Caso 2 costo total anual hundimientos de tensión con costo unitario método



De la Figura 13, se concluye que el costo total asociado a la ocurrencia de los 73 hundimientos de tensión durante año 2022 es de \$734'.863.209. Sin embargo, como se presenta

en la Tabla 4 el costo total por la ocurrencia de los 73 hundimientos de tensión durante el año 2022 fue de \$605.740.232.

La diferencia entre el costo total calculado con el método y el costo total estimado por con el cliente es de \$129'.122.978.

En la Tabla 6 se observa el resumen de los casos expuestos anteriormente:

Tabla 6.

Resumen casos analizados

Casos	Costo Hundimientos		Desviación (\$)
	Tensión Estimación Método (\$)	Tensión Estimación Cliente (\$)	
Caso 1	2.738.120.453	2.257.044.699	240.537.877
Caso 2	221.465.624	182.551.850	19.456.887
Caso 3	734.863.210	605.740.232	64.561.489

Para el cálculo de la desviación entre la estimación del costo de los hundimientos de tensión utilizando el método propuesto y la estimación realizada por el cliente, se asume que los datos representan la población total. Según los resultados de desviación presentados en la Tabla 5, en los tres casos propuestos, el costo total anual estimado con el método aplicado en este trabajo no se desvía significativamente del valor estimado por el cliente. Esto sugiere que no hay una alta dispersión de los datos calculados.

Como se ha mencionado, la sensibilidad a los hundimientos de tensión percibida por los elementos que componen los procesos de cada cliente puede variar. De igual manera, el impacto de estas paradas en los costos también puede ser diferente, dependiendo del efecto que tengan en las operaciones del cliente. Por ejemplo, el costo asociado a la caída de un proceso industrial provocado por causa de un hundimiento de tensión debe incluir al menos el cierre del proceso, la

limpieza del sistema, el reinicio del proceso, la pérdida de producción y el costo eventual de los equipos dañados.

Teniendo en cuenta esto, las diferencias en los costos totales calculados para cada uno de los casos pueden deberse a los distintos tipos de clientes encuestados en el método descrito en Heine, et. al., (2002). De acuerdo con la encuesta realizada a clientes industriales en Heine, et. al., (2002), más del 50% de ellos indicaron que las caídas y las interrupciones no les causan pérdidas económicas, mientras que entre el 1% y el 2% experimentaron costos extremadamente altos. Aunque las cifras recopiladas en las encuestas pueden ser reales, existe el riesgo de que algunas sean exageradas. Por lo tanto, lo que se propuso en Heine, et. al., (2002) para asegurar la estimación del costo unitario y, sobre todo, para evitar cifras sobreestimadas, fue la aplicación de reducción de picos, es decir, todos los costes declarados por los clientes superiores a 20.000 euros se consideraron iguales a 20.000 euros. Estos casos representaron aproximadamente el 1% del número total de clientes. En consecuencia, el precio estima para un hundimiento de tensión es el presentado en la Tabla 3.

En conclusión, en los tres casos propuestos, el valor unitario de los hundimientos de tensión determinado mediante el método seleccionado no se desvía significativamente del valor estimado por el cliente. Esto indica que la estimación es adecuada para la ocurrencia de hundimientos de tensión para este tipo de clientes en Colombia.

5. Conclusiones y recomendaciones

La búsqueda de un método adecuado para la estimación de pérdidas económicas debido a hundimientos de tensión, planteada en este trabajo de aplicación, permitió identificar diversos enfoques utilizados para abordar el problema. A través del análisis de artículos de la literatura científica y basándonos en los resultados de estudios previos, se selecciona un método que facilita el cálculo de las pérdidas económicas. El criterio decisivo para elegir este método es su capacidad para estimar las pérdidas de manera efectiva, además de su facilidad de implementación, dado que se contaba con información histórica sobre la frecuencia de ocurrencia de los hundimientos de tensión en el caso de estudio del presente trabajo de investigación.

Mediante la implementación del método para la estimación de pérdidas económicas a causa de hundimientos de tensión, se solucionó de manera satisfactoria al problema propuesto en este trabajo de aplicación. Los resultados obtenidos en los casos propuestos muestran que la estimación de las pérdidas económicas anuales, calculadas mediante el método seleccionado, no se desvía significativamente del valor estimado por el cliente. Esto sugiere que la estimación obtenida mediante el método implementado es adecuada para este tipo de clientes en Colombia. Adicionalmente, se observó que, a pesar de la relativamente baja frecuencia de hundimientos, los costos anuales calculados son bastante altos.

Es necesario realizar estudios adicionales para representar con mayor precisión los inconvenientes asociados con los hundimientos de tensión y las pérdidas económicas reales. Para ello, se pueden implementar modelos de encuestas que permitan clasificar y/o categorizar los tipos de clientes conectados a la red, como conocer los costos asociados a este tipo de perturbaciones.

No obstante, es evidente que las caídas de tensión representan un problema significativo para la calidad de la energía en estos clientes y tienen una importancia económica considerable, que probablemente aumentará en los próximos años. Además, se recomienda evaluar el costo de manera específica para cada caso, es decir, evento por evento, ya que la sensibilidad de las cargas a los hundimientos puede variar considerablemente entre clientes.

El análisis de las pérdidas económicas debe considerar los diferentes sectores industriales para establecer criterios específicos para cada uno. Con fines regulatorios, se podría clasificar a los sectores industriales según el comportamiento de los hundimientos de tensión, con el objetivo de mejorar la estimación de pérdidas y definir las relaciones necesarias para establecer indicadores y normativas adecuadas. Contar con esta información permitiría a las empresas de distribución de energía eléctrica una mejor toma de decisiones operacionales, planificar de manera más eficaz el sistema eléctrico y asegurar que fenómenos como los hundimientos de tensión ocurran con la menor frecuencia posible. Por otro lado, las industrias podrían optimizar sus procesos y tomar decisiones de inversión más acertadas al implementar medidas correctivas utilizando el método aquí presentado, con el fin de mejorar la relación costo-beneficio. Todo lo anterior contribuye a un mayor nivel de interactividad entre los operadores de red y los clientes industriales, al identificar posibles riesgos de falla y proponer mitigaciones para reducir al máximo las pérdidas económicas.

Referencias Bibliográficas

- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2005). *Resolución CREG 024 de 2005: Por la cual se establecen las normas para la determinación de la calidad del servicio de energía eléctrica*. Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2007). *Resolución CREG 016 de 2007: Por la cual se modifica la metodología para la determinación de los cargos por el uso de las redes de transporte de energía eléctrica*. Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2012). *Resolución CREG 065 de 2012: Por la cual se establecen las normas para la medición de la calidad del servicio de energía eléctrica*. Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- Dinero en el Tiempo. (s.f.). *Evolución del euro en España (1995-2022)*.
<https://www.dineroeneltiempo.com/inflacion/euro-espana?valor=1&ano1=1995&ano2=2022>
- Gómez, D., & Quesada V., (2010). *El Costo de las Perturbaciones Eléctricas en Empresas Industriales y Empresas de Economía Digital*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Ingeniería Eléctrica, Universidad De El Salvador.
- Gupta, C. P., Milanovic, J. V., & Aung, M. T. (2004). The influence of process equipment composition on financial losses due to voltage sags. *11th International Conference on Harmonics and Quality of Power* (IEEE Cat. No.04EX951), 28–34.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2004.1409324>

- Heine, P., Pohjanheimo, P., Lehtonen, M., & Lakervi, E. (2002). A method for estimating the frequency and cost of voltage sags. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(2), 290–296. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.1007895>
- ICONTEC. (2008). *Calidad de la Potencia Eléctrica. Límites y Método de Evaluación en Punto de Conexión Común - NTC 5001*.
- IEC 61000-4-30, (s.f.) "*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*," International Electrotechnical Commission
- IEEE Std 1159-2019 (2019) "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," *Revision of IEEE Std 1159-2009*, vol., no., pp. 1-98, 13 doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486
- IEEE. (2000). *IEEE Std 1564-2000: Standard for Testing the Electrical Performance of Optical Transmitter Modules for Single-Mode Fibers*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Jhan Yhee Chan, & Milanovic, J. V. (2007). Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions. *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EPQU.2007.4424119>
- Kennedy, J., Morcos, M., & Lo, A. (2020). Cost Allocation of Voltage Unbalance in Distribution Networks. *19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP46026.2020.9177935>
- Majumder, S., Khaparde, S. A., Pradhan, V., Kulkarni, S. V., Agalgaonkar, A. P., Perera, S., & Ciufu, P. (2016). A critical review on the methods for calculating the risk of process failure

- because of voltage sags. *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2016.7754042>
- Milanovic, J. V., & Gupta, C. P. (2006). Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(2), 918–924. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.870988>
- Motoki, É. M., Filho, J. M. de C., da Silveira, P. M., Pereira, N. B., & de Souza, P. V. G. (2021). Cost of Industrial Process Shutdowns Due to Voltage Sag and Short Interruption. *Energies (Basel)*, 14(10), 2874-. <https://doi.org/10.3390/en14102874>
- Rivier, J., & Gomez, T. (2000). A conceptual framework for power quality regulation. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. *Proceedings* (Cat. No. 00EX441), 2, 469–474 vol. 2. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2000.897724>
- Wang, J., Chen, S., & Lie, T. T. (2004). Estimating economic impact of voltage sags. 2004 International Conference on Power System Technology. *PowerCon*, 1, 350-355 Vol.1. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2004.1460019>