



Revista

MINERVA

VOL. 6, NÚM. 2 2023
NÚMERO ESPECIAL
INGENIERÍA ELÉCTRICA
ISSN 2521-9794



**UNIVERSIDAD
DE EL SALVADOR**



SIC-UES

Secretaría de Investigaciones Científicas
de la Universidad de El Salvador

REVISTA MINERVA

Revista Científica Multidisciplinaria

Volumen 6, Número 2

Número Especial Ingeniería Eléctrica

ISSN 2521-8794

<https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Universidad de El Salvador

Secretaría de Investigaciones Científicas. Final
Avenida Héroes y Mártires del 30 de Julio de 1975,
Ciudad Universitaria "Dr. Fabio Castillo Figueroa",
San Salvador, El Salvador.

Teléfono:

+503 2225-8434

Correo electrónico:

revista.minerva@ues.edu.sv

Periodicidad:

Se publica semestralmente, con dos números
anuales correspondientes a los períodos enero-junio
y julio-diciembre.

Objetivo:

Difundir investigaciones inéditas y originales, de
calidad científica, elaboradas por los miembros de
la comunidad académica y profesional nacional e
internacional.

Alcance:

Revista Minerva cumple con los principios de
acceso abierto. Publica artículos científicos de las
diferentes áreas del conocimiento entre ellas la
Física, la Química, la Biología, las Matemáticas,
Ciencias Ambientales, Ciencias Sociales, Ciencias
Humanísticas, Medicina, Ingeniería, entre otras. La
revista acepta artículos de investigación, revisión y
reflexión en español.

ACLARATORIA

LAS IDEAS Y OPINIONES CONTENIDAS
EN LOS TRABAJOS Y ARTÍCULOS SON DE
RESPONSABILIDAD EXCLUSIVA DE LOS AUTORES
Y NO EXPRESAN NECESARIAMENTE EL PUNTO DE
VISTA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.



MINERVA es una revista con
licencia creative commons 4.0
CC BY: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Ing. Agr. M.Sc. Juan Rosa Quintanilla Quintanilla
Rector

Dra. Evelyn Beatriz Farfan Mata
Vicerrectora Académica

M.Sc. Roger Armando Arias Alvarado
Vicerrector Administrativo

Lic. Pedro Rosalío Escobar Castaneda
Secretario General

Lic. Carlos Amilcar Serrano Rivera
Fiscal General

M.Sc. Carlos Armando Villalta
Presidenta Asamblea General Universitaria (AGU)

Ing. Agr. M.Sc. José Miguel Sermeño Chicas
Secretario de Investigaciones Científicas; Director
Ejecutivo del Consejo de Investigaciones Científicas

COMITÉ TÉCNICO

Director Editor
Isidro Galileo Romero
isidro.romero@ues.edu.sv

Correctores de Estilo
Cristina Isabel Guzmán Cruz
cristina.guzman@ues.edu.sv

Selvin Mauricio Montano Quintanilla
selvin.montano@ues.edu.sv

Edición Adjunta y Maquetación
Ever Martínez
ever.martinez@ues.edu.sv

Saul Antonio Vega
saul.vega@ues.edu.sv

Soporte Técnico
Saul Antonio Vega
saul.vega@ues.edu.sv

COMITÉ EDITORIAL

Brenda Iliana Gallegos

Docente de Educación Alimentaria y Nutricional, Facultad de Medicina, Universidad de El Salvador

Dagoberto Pérez

Docente de Cultivos Anuales, Departamento de Ciencias Agronómicas, Facultad Multidisciplinaria Paracentral, Universidad de El Salvador

David A. Hernández

Coordinador Becas de Posgrado, Universidad de El Salvador

Evelin P. Gutiérrez de Doradea

Investigadora, Unidad de Investigación, Facultad de Jurisprudencia y Ciencias Sociales, Universidad de El Salvador

José Roberto Ramos López

Docente, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de El Salvador

Rudis Yilmar Flores

Docente Investigador, Facultad Multidisciplinaria Oriental, Universidad de El Salvador

Mario Ernesto Parada Jaco

Laboratorio de Parasitología Vegetal. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)

Luis Pineda

Técnico en Gestión de Cuencas y Humedales. Autoridad Científica en Fauna Silvestre - CITES. Dirección General de Ecosistemas y Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MARN, El Salvador

COMITÉ CIENTÍFICO

Andrea L. Joyce

Assistant Professor, University of California, Merced. Estados Unidos

Ignacio Aisur Agudo Padrón

Gerente Investigador Projeto "Avulsos Malacológicos - AM", Florianópolis, Santa Catarina / SC, Brasil

James Iffland

Professor in the Languages department at Boston University

José Rutilio Quezada

Consultor Internacional. Manejo Integrado de Plagas y Control Biológico, Estados Unidos

Luis A. Mejía

Adjunct Professor, Department of Food Science and Human Nutrition University of Illinois, Urbana-Champaign

Mónica Lara Uc

Profesora Investigadora, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México

Paul Almeida

Professor and Chair of Sociology, University of California, Merced. Estados Unidos

Pedro José Toruño

Profesor, Departamento de Agroecología, Escuela de Ciencia Agraria y Veterinaria, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León (UNAN-LEÓN)

Randy Atencio Valdespino

Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá

Tania Vianney Gutiérrez Santillán

Estancia Postdoctoral, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Víctor D. Carmona-Galindo

Professor, Biology Department, Natural Science Division, University of La Verne, La Verne, California, USA

William R. Fowler

Cross College Scholar, Founder and Editor-in-Chief, Ancient Mesoamerica, Associate Professor, Department of Anthropology / Vanderbilt University. Estados Unidos

Carmen Aída Escobar Ramírez

Profesora-Investigadora, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

REVISTAS CONSORCIADAS

Revista Iberoamericana Ambiente y Sustentabilidad

Red Iberoamericana de Medio Ambiente (REIMA, A.C.) y Pan American Foundation for International Cooperation for Sustainable Development

NOTAS TÉCNICAS | TECHNICAL REPORTS

Análisis Comparativo del uso de aceite mineral y aceite vegetal en transformadores de distribución**5**

Comparative Analysis of the Use of Mineral Oil and Vegetable Oil in Distribution Transformers

Amigdael Osmir Calderón Cerna, Juan Ernesto Pérez Lúe, Ramiro Moisés Pérez Mendoza, Kevin Rolando Sánchez Yescas, Armando Martínez Calderón

Diseño e Implementación de un Generador de Huecos de Tensión para Pruebas de Robustez**19**

Design and Implementation of a Voltage Dip Generator for Robustness Tests

Byron Cantor Pérez, Cristóbal Isaías Chafoya Castro, Víctor Salomón Sagastume Peñate, Josué Geovanni Lúe González, José Roberto Ramos López

Integración de servicios de ciberseguridad y enrutamiento usando software libre basado en pfSense**31**

Integration of cybersecurity and routing services using free software based on pfSense

Josue Daniel Osorto-Rivera, Oscar Rene Miranda Urbina, Carlos Osmin Pocasangre Jimenez



DOI: 10.5377/revminerva.v6i2.17082

Nota Técnica | Technical Report

Análisis Comparativo del uso de aceite mineral y aceite vegetal en transformadores de distribución

Comparative Analysis of the Use of Mineral Oil and Vegetable Oil in Distribution Transformers

Amigdael Osmir Calderón Cerna¹

Juan Ernesto Pérez Lúe¹

Ramiro Moisés Pérez Mendoza¹

Kevin Rolando Sánchez Yescas¹

Armando Martínez Calderón¹

Correspondencia:
armando.martinez@ues.edu.sv

Presentado: febrero de 2023
Aceptado: septiembre de 2023

¹ Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador

RESUMEN

El uso de aceite como aislante dieléctrico es parte fundamental del funcionamiento y vida útil de los transformadores. La función más importante que debe desarrollar un aceite dieléctrico es la de enfriamiento y disipación del calor generado durante la operación de los transformadores, siendo el aceite mineral, el tradicionalmente usado en este tipo de aplicaciones. Sin embargo, en la actualidad se han empezado a desarrollar aceites de tipo vegetal que resultan atractivos debido a su alta biodegradabilidad y punto de inflamación. Este artículo está elaborado de la siguiente manera: primero se realiza una breve descripción del aislamiento usado en el transformador, en la segunda parte se presentan las características químicas, físicas y eléctricas que debe poseer un aceite para que realice su función de manera efectiva. Finalmente se presenta un análisis de los resultados de la transferencia de calor de ambos tipos de aceites.

Palabras clave: Aceite vegetal, aceite mineral, seguridad medio ambiental, transformador.

ABSTRACT

The use of oil as dielectric insulator is a fundamental part of the operation and useful life of transformers. The most important function that a dielectric oil must develop is the cooling and dissipation of heat generated during the operation of transformers, being mineral oil the one traditionally used in this type of applications. However, nowadays vegetable oils have started to be developed, which are attractive due to their high biodegradability and flash point. This article is elaborated as follows: first, a brief description of the insulation used in the transformer is given. In the second part, the chemical, physical and electrical characteristics that a given oil must have in order to perform its function effectively are presented. Finally, an analysis of the heat transfer results of both types of oils is presented.

Keywords: Vegetable oil, mineral oil, environmental safety, transformer.

INTRODUCCION

Los transformadores de distribución tienen una gran presencia en las redes eléctricas, por ello resulta importante que se desempeñen adecuadamente y tengan un amplio periodo de funcionamiento. Por tanto, es de suma importancia realizar un óptimo diseño que le permita realizar sus principales funciones de la mejor manera. El fluido ampliamente utilizado como aislante dieléctrico es el aceite mineral, debido a que posee buenas características físicas, químicas y eléctricas, tales como la viscosidad, la cual permite realizar mejor su función de transferencia de calor de las bobinas hacia el exterior (RTE de Mexico, 2013). Sin embargo, en la actualidad se ha empezado a utilizar aceite vegetal en transformadores de distribución que además de ser un fluido altamente biodegradable (amigable con el medioambiente) también posee un alto punto de inflamación, lo cual lo hace ideal para su uso en condiciones severas de operación donde las temperaturas alcanzan valores muy altos. El aceite vegetal parece ser el sustituto ideal del aceite mineral (Revista Electricidad, 2018). No obstante, se necesita seguir realizando estudios que permitan comprobar su funcionamiento en distintas condiciones de operación.

Aislamiento usado en transformadores

El aceite en los transformadores sirve como aislante y refrigerantes. Su mecanismo de operación es impregnar el papel que envuelve el cobre de las bobinas en el transformador y transportar el calor generado en este punto por las variaciones de corrientes, al exterior. El aceite evita la formación de arcos eléctricos. La ruptura eléctrica de los gases acompañados por la descarga y la ionización resultante, conocida como corona, protege al equipo frente a descargas eléctricas en su interior, mismas que pueden dañar la aislación, sus partes, o en el peor de los casos, provocar una pérdida total del transformador.

Los transformadores están constituidos principalmente por dos sistemas de aislamiento; el sólido y el líquido. El líquido es un aislamiento de fácil mantenimiento y tratamiento para la recuperación de sus propiedades, de hecho, si está muy deteriorado se podrá sustituirlo con un costo moderado. Además, el aceite actúa como elemento refrigerante conduciendo el calor desde la parte activa del transformador, núcleo y arrollamiento, hacia el exterior. Sin embargo, el aislamiento sólido es el encargado de recubrir el cobre del interior del transformador, por lo que no es pensable la sustitución del mismo o tratarlo.

La no accesibilidad del aislamiento sólido del transformador hace más complicado el diagnóstico, por lo que dicho diagnóstico se realiza por medio del aceite aislante (aislante líquido). El estado de envejecimiento de un transformador es de vital importancia para poder planificar su sustitución. Si un transformador se pone fuera de servicio antes de tiempo se está desaprovechando dicha máquina, lo que supone usos de recursos poco eficientes. Si, por el contrario, no fuese retirado de servicio un transformador que está al final de su vida útil se correrá los riesgos de fallos y a causa del mismo puede conllevar a perjuicios económicos ya sea por reclamos de usuarios o multas, entre otros. El conocimiento de la vida de un transformador no es algo simple ya que la pérdida de vida depende de muchos factores tal como la calidad de fabricación, calidad de mantenimiento, temperatura ambiente, grado de carga, etc (Martínez Amaya et al., 2014).

Así, teniendo un buen seguimiento continuo y adecuado de mantenimiento dará como resultado un aproximado de su estado y de esta manera poder prestar a sus usuarios, un servicio de energía eléctrica que cumpla con los índices o indicadores de calidad exigidos por las normas de la SIGET. Esto lleva a poner una particular atención al estado del transformador y a sus aislantes, especialmente al aislante líquido, ya que a través de él se puede dar cuenta del

buen o mal funcionamiento que presente el transformador, y así poder prevenir futuras fallas o perturbaciones a los usuarios, también así poder prever el reemplazo del mismo (Martínez Amaya et al., 2014).

Aislamiento sólido

El sistema de aislamiento sólido, de los transformadores de potencia sumergidos en aceite, está constituido por papel Kraft y Carton Prensado (o pressboard), y debido a su función se considera la parte más importante del sistema de aislamiento, ya que separa los devanados en la parte activa, los cuales si sufren degradación reducen considerablemente la vida útil del transformador. El aislamiento sólido está diseñado a base de celulosa tratados por el método Kraft, el cual es un proceso que consiste en la cocción de troncos de madera con una solución alcalina de sulfato de sodio e hidróxido de sodio, usando el primero como solución catalizadora, y de este procedimiento resultan papeles térmicamente mejorados para usarse como aislamientos sintéticos, que en general poseen diferentes espesores y densidades acordes a los esfuerzos dieléctricos y mecánicos a los que son sometidos durante la operación del transformador. Su función en la operación del transformador es aislar las partes metálicas con tensión, dividir los espacios de aceite en volúmenes más pequeños aptos para soportar mayores gradientes de campo y soportar mecánicamente los conductores y arrollamientos con el resto de la estructura (RTE de México, 2013).

El aislamiento sólido también se utiliza para formar sistemas de barreras divisorias en el aceite, dividiendo el espacio entre arrollamientos en canales y aumentando así la rigidez dieléctrica del aceite en los canales. El aislamiento a partir de pura celulosa "Kraft" proporciona excelentes características de impregnación de aceite, por lo tanto un excelente rendimiento en los campos eléctricos, tiene una buena estabilidad geométrica en aceite, es fácil de moldear, de alta densidad, uniforme, alta rigidez mecánica,

buena flexibilidad, alta rigidez dieléctrica (mayor que la del aceite mineral), resistencia térmica, buena transferencia de calor, y es con mucho, el aislamiento sólido más económico para la refrigeración en aceite de transformadores de potencia (Martínez Amaya et al., 2014).

Clasificación de los aislamientos sólidos

Aislamientos delgados y calientes (Martínez Amaya et al., 2014). Son los aislamientos que están en contacto directo con los conductores y suelen estar constituidos por papel Kraft, por lo que son los aislamientos menos densos. En total suponen alrededor de un 20 % de la masa total del aislamiento sólido. Su temperatura se mantiene próxima a la del conductor, y se estima que un 5 % de ellos está a una temperatura próxima a la del punto caliente (Martínez Amaya et al., 2014).

Aislamientos delgados y fríos

Dentro de esta categoría se clasifican todos los cartones prensados, y en general todos los elementos dieléctricos de los arrollamientos que no están en contacto directo con los conductores. La temperatura de estos aislamientos es similar a la del aceite. Los aislamientos delgados y fríos tienen una densidad entre media y baja. Suponen entre el 20 % y el 30 % de la masa total del aislamiento sólido (Martínez Amaya et al., 2014).

Aislamientos gruesos

Son las piezas celulósicas utilizadas para sujetar mecánicamente los conductores. Representan alrededor del 50 % de la masa total de aislamiento sólido. Están constituidos por materiales celulósicos de elevada densidad y suelen presentar temperaturas más reducidas que otras zonas del transformador (Martínez Amaya et al., 2014).

Envejecimiento del papel aislante

El proceso de envejecimientos del papel es esencialmente una despolimerización (Piñeros, 2015). Cuando los vínculos entre las unidades, en las cadenas de celulosa, se rompen, el grado

de polimerización y la resistencia mecánica se reducen.

Cuando se obtiene el papel, este presenta un grado de polimerización (DP) aproximadamente de 1200. Después de pasar por el proceso de secado en la fábrica este DP se reduce a 1000 con un contenido en agua de 0,5 %, comúnmente cuando el DP a caído cerca del 200, La resistencia a la tracción se reduce en torno a un 20 % de su valor original. La resistencia a la tracción mecánica del papel depende de su grado de polimerización. Por debajo de un grado de polimerización de 200 no se garantiza que el transformador sea capaz de soportar los esfuerzos de repulsión de cortocircuitos y el transformador debe destruirse. En un transformador de potencia se producen muchos procesos de envejecimiento debido a factores internos que se dan cuando el transformador está en servicio. El aislamiento sufre principalmente por reacciones químicas tales como pirolisis (degradación térmica), la oxidación (oxígeno en el aislante) y la hidrólisis (humedad) (Martínez Amaya et al., 2014).

Aplicaciones de líquidos aislantes en transformadores

En la actualidad hay varios tipos de fluidos empleados como medio aislante en transformadores de distribución y potencia, en la Tabla 1 se muestra un resumen de la aplicación de líquidos aislantes en transformadores (Piñeros, 2015).

Tabla 1

Grado de uso de aceites aislantes

| Transformadores | Aceite Mineral | Siliconas | Ésteres Sintéticos | Ésteres Naturales (aceites vegetales) |
|-----------------|----------------|-----------|--------------------|---------------------------------------|
| Potencia | USADO | NO USADO | USADO | USADO |
| Distribución | USADO | USADO | USADO | USADO |
| Medición | USADO | NO USADO | NO USADO | NO USADO |

Nota. Tomado de SIGET (2003)

Propiedades físico-químicas

La Tabla 2 permite comparar de manera rápida las propiedades físico-químicas de especial relevancia para un fluido aislante de un transformador.

Color

El color del aceite vegetal generalmente es verde y el aceite mineral es transparente; ambos cambian según los años de servicio, el verde es amigable con el medio ambiente, el fabricante lo presenta como biodegradable, que no necesita un proceso complejo para el desecho con respecto al aceite mineral.

Composición química

Se puede señalar que el aceite mineral es una mezcla compleja de hidrocarburos producida a partir de destilación del petróleo. En cambio, tanto el aceite de silicona como los ésteres sintéticos son productos químicos: el aceite de silicona consiste en una mezcla de polímeros inorgánicos-orgánicos y los ésteres sintéticos se forma por la unión química de un alcohol con un ácido graso. Esta última reacción química se produce también en los ésteres naturales, que se obtienen por refinado de una amplia variedad de aceites (soya, colza, aceite de girasol) (Cicuéndez Simonneau, 2012).

Seguridad medioambiental

Los líquidos aislantes con una biodegradabilidad elevada y baja toxicidad son considerados como amigables con el medioambiente. Estos dos

Tabla 2

Principales propiedades de los líquidos aislantes

| Nombre | Aceite mineral | Aceite de silicona | Éster sintético | Éster natural |
|---|--|---|--|--|
| Tipo | Destilado del petróleo | Sintético | Sintético | Aceite vegetal refinado |
| Componentes principales | Mezcla compleja de hidrocarburos | Siloxanos o polisiloxanos polimerizados | Un poliol con ácidos carboxílicos naturales o sintéticos enlazados | Cadena central de glicerol con 3 ácidos grasos naturales enlazados |
| Fuente | Petróleo | Producto químico | Producto químico | Extraído de cultivos |
| Biodegradabilidad | Muy baja | Muy Baja | Muy alta | Muy alta |
| Estabilidad frente a la oxidación | Aceite de silicona (Exc.)> éster sintético (Exc.)> aceite mineral (Buena)> éster natural (susceptible) | | | |
| Tra de inflamación °C | 160-170 | >300 | >250 | >300 |
| Tra de ignición °C | 170-180 | >350 | >300 | >350 |
| Clasificación frente al fuego (IEC 61100) | O | K3 | K3 | K2 |
| Saturación de agua a Ambiente (ppm) | 55 | 220 | 2600 | 1100 |
| Viscosidad | Aceite mineral < silicona baja viscosidad < éster sintético < silicona < éster Natural | | | |

Nota. Tomado de Huillca Cameron (2015)

factores son importantes cuando se considera el uso de líquidos aislantes en áreas donde el ambiente no es normal e intervienen otros factores. Los ésteres naturales y sintéticos están clasificados como biodegradables y no dañinos para el medioambiente, mientras los aceites minerales y silicona tienen más baja la biodegradación y más nocivos para el medioambiente (Cicuéndez Simonneau, 2012).

Oxidación

La estabilidad de los líquidos aislantes frente a la oxidación es un aspecto clave, ya que esta puede modificar las propiedades físico-químicas (propiedades dieléctricas, capacidad de corrosión, viscosidad, etc) de los fluidos,

afectando negativamente el funcionamiento del transformador. En el aceite de silicona químicamente inerte tiene buena resistencia a la oxidación. Este proceso se produce muy lentamente y a temperaturas mayores de 175 °C no generándose ácidos ni lodos peligrosos. En cambio, en el caso de los ésteres sintéticos, el proceso se produce con temperaturas de 125 °C en adelante, generándose además ácidos orgánicos. Por lo que respecta al aceite mineral, se comienza a oxidar y volatilizar con temperaturas superiores a 105 °C, produciéndose muchos subproductos resultados de la degradación, entre ellos ácidos orgánicos y lodos. Estos subproductos pueden reducir las propiedades

dieléctricas del líquido aislante y corroer los metales. Por último, los ésteres naturales son los más susceptibles a la oxidación, dependiendo su grado de estabilidad de su composición química. No obstante, independientemente de su composición, esta reacción produce líquidos gelatinosos y otros productos (alcoholes, ácidos, etc.) que aumentan además su viscosidad, reduciendo así su capacidad refrigerante (Cicuéndez Simonneau, 2012).

Punto de Inflamación

Para determinar el punto de inflamación se aplica la norma ASTM D 92 en esta característica el valor cambia drásticamente, el menor valor lo presenta el aceite mineral permitido de 145 °C y el mayor valor lo tiene el aceite vegetal permitido de 275 °C. Los fabricantes ponen mucho énfasis en esta característica, que a simple vista se observa que la temperatura del líquido inflamable la soporta mejor el aceite vegetal en ambientes donde la temperatura es alta.

Seguridad contra incendios

La seguridad contra incendios desempeña un papel clave en aplicaciones específicas, por ejemplo, ambientes susceptibles a explosiones y fuego, que pongan en riesgo la vida humana o generar elevados costes económicos. Así son los líquidos alternativos, nos ofrecen una mayor ventaja por su alto grado de seguridad contra incendios (Clase K) gracias a su baja susceptibilidad al fuego (Tabla 3-5). Además, esto supone que las instalaciones dotadas con estos fluidos tengan menores costes de instalación y mantenimiento de los equipos de seguridad, que su riesgo de incendio sea mucho menor en caso de fallo eléctrico importante (IEC 61100) y que producido no sea tóxico y de baja densidad.

Propiedades de los Fluidos

Contenido de agua

El contenido de agua es de las características más importantes para ambos tipos de aceites la norma ASTM 1533 permite valores de 35

Tabla 3

Punto de flameo, Clasificación de los Fluidos según IEC-61100

| Clase | punto de fuego |
|-------|----------------|
| O | ≤ 300°C |
| K | > 300°C |
| L | NO MEDIBLE |

Nota. Tomada de Piñeros (2015)

Tabla 4

Poder calorífico

| Clase | Valor neto calorífico |
|-------|-----------------------|
| 1 | ≥ 42 MJ/Kg |
| 2 | ≤ 42 MJ/kg ≥ 32 MJ/Kg |
| 3 | < 32 MJ/Kg |

Nota. Tomada de Piñeros (2015)

Tabla 5

Propiedades de los líquidos aislantes

| Tipo De Fluido | Punto de Inflamación °C | Punto de Fuego °C | Clase |
|--------------------|-------------------------|-------------------|-------|
| Aceite Mineral | 160 – 170 | 170 - 180 | O |
| Fluido de Silicona | >300 | >350 | K3 |
| Ester Natural | >300 | >350 | K2 |
| Ester Synthetic | >250 | >300 | K3 |

Nota. Tomada de Piñeros (2015)

ppm para aceites minerales y el valor asciende para aceites vegetales a 200 ppm, destacar que el aceite vegetal retiene más contenido de agua, los fabricantes presentan esto como ventaja, debido a que aumenta la vida útil del aislamiento sólido.

Solubilidad del agua

Los ésteres sintéticos y naturales, por su mayor grado de polaridad, son capaces de disolver mayor cantidad de agua que los aceites minerales y de silicona. Esta propiedad es clave

para determinar la tensión de ruptura de estos fluidos (Cicuéndez Simonneau, 2012).

Humedad de saturación

Los ésteres tienen límites mucho más altos de saturación en todas las temperaturas que el aceite mineral.

En condiciones normales, la saturación de agua de los aceites ésteres naturales es de 5 a 8 veces más que la de aceites minerales. Los ésteres tienen una mayor afinidad por el agua que el aceite mineral. En los sistemas éster/papel, el papel retiene menos agua que en sistemas aceite mineral/papel (Piñeros, 2015).

Los transformadores llenos con ésteres permitirán la reducción del tiempo de secado en las unidades en campo usando secado por aceite caliente. El límite permisible de humedad en los aceites éster puede ser mucho mayor que el permitido para el aceite mineral (Figura 1).

Viscosidad

La viscosidad de un fluido juega un papel clave en la determinación de su capacidad de refrigeración. Salvo el aceite de silicona de

baja viscosidad, el resto de fluidos alternativos son más viscosos que el aceite mineral. Como consecuencia, su capacidad de refrigeración será menor, aumentando la temperatura de funcionamiento del transformador. Además, la impregnación de los aislantes de celulosa durante el proceso de fabricación del transformador se verá dificultada por esa alta viscosidad.

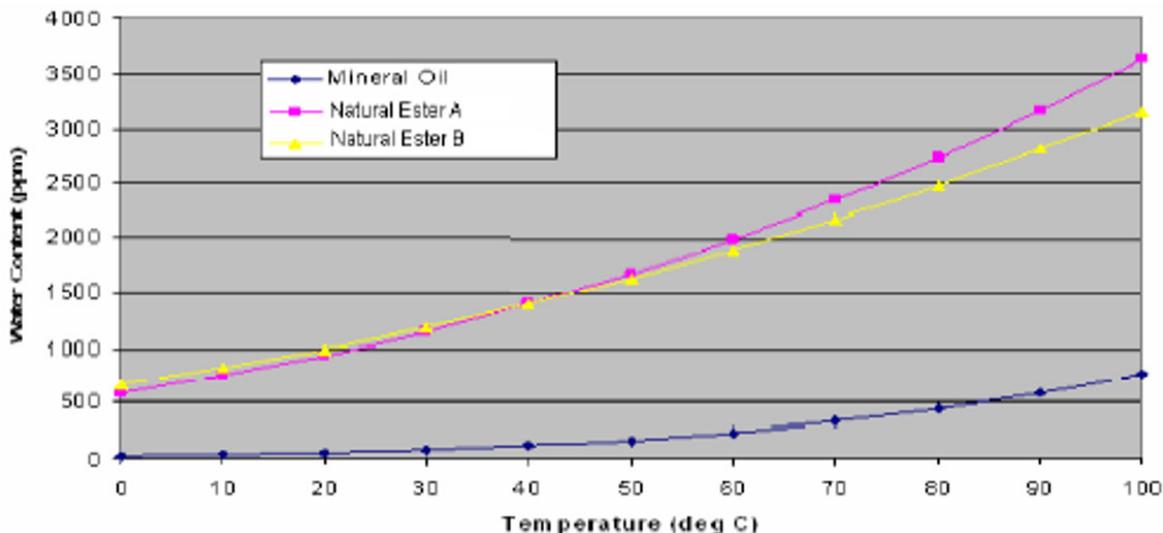
La viscosidad cinemática es una característica que presenta un valor significativo en el cambio de aceite, pues los valores presentan un aumento, para aceites vegetales a temperatura normal de operación, en un rango que varía desde los $31 \text{ mm}^2/\text{s}$ hasta alcanzar valores de $42 \text{ mm}^2/\text{s}$ en relación con aceites minerales que presentan valores de $9 \text{ mm}^2/\text{s}$ hasta valores máximos de $12 \text{ mm}^2/\text{s}$. Se puede observar que los aceites vegetales tienen una mayor viscosidad que puede presentar problemas al desarrollar la función de refrigeración con respecto al aceite mineral.

Densidad Relativa

La densidad relativa no presenta un cambio significativo los valores mantienen un margen

Figura 1

Temperatura de saturación de líquidos aislantes



Nota. Tomada de Piñeros (2015)

que permanece en valores cercanos a 0.9 para ambos tipos de aceites los cuales cumplen con la norma ASTM1298 que permite un valor máximo para aceite vegetal de 0.96 a una temperatura de 15 °C.

Miscibilidad

La miscibilidad (Tabla 6) de los líquidos alternativos, con el aceite mineral y entre sí, es una propiedad importante al momento de proceder a la sustitución de uno de ellos: el procedimiento de lavado del transformador será más eficaz si el líquido usado es miscible con el líquido sustitutivo. Esto no quiere decir que un procedimiento de rellenado pueda llevarse a cabo con fluidos inmiscibles, pero sí debería tenerse más cuidados en estos casos.

A temperatura ambiente, tanto los ésteres como el aceite de silicona son miscibles con el aceite mineral. En cambio, los ésteres no son miscibles con aceite de silicona. Pequeñas cantidades de aceite de silicona en los ésteres puede causar la formación de espuma.

Biodegradabilidad

Los transformadores inmersos en aceite vegetal, los derrames de aceite vegetal pueden ser eliminados a través de medios normales y no se tratan como residuos tóxicos (Figura

2). También ofrece un descarte potencial de sanciones gubernamentales y costosos procedimientos de limpieza ocasionados por derrames. Reducen al mínimo la contaminación del aire durante la combustión.

Beneficios Expectativa de Vida

Menor envejecimiento de la celulosa las pruebas realizadas con aceite vegetal han mostrado una más baja tasa de envejecimiento en comparación con el papel impregnado de aceite mineral que lleva a un aumento de la vida útil del sistema de aislamiento, por lo tanto, en la vida útil del transformador (Figura 3 y 4).

Propiedades eléctricas

Con relación a las propiedades eléctricas, la mayoría de los parámetros que se estudian buscan caracterizar desde el punto de vista dieléctrico estos fluidos.

Tensión de ruptura

Se puede determinar la tensión de ruptura de estos líquidos. Generalmente deben de cumplir con el nivel de aislamiento requerido para garantizar que no exista la formación de arcos eléctricos que involucren las partes internas del transformador que le puedan causar daños. Así como la celulosa impregnada en el papel,

Tabla 6

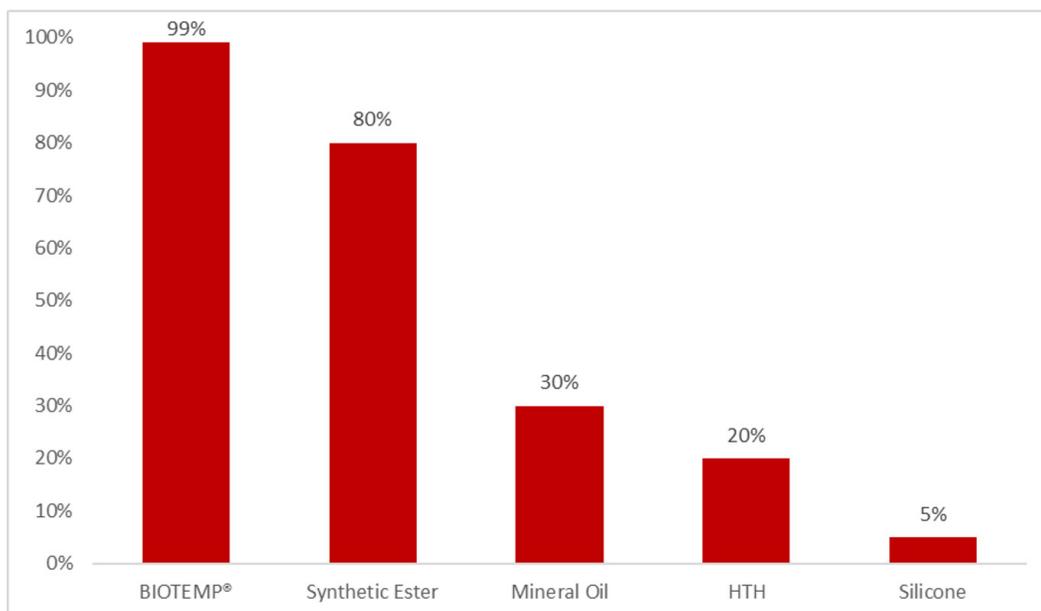
Miscibilidad entre líquidos aislantes a temperatura ambiente

| | Aceite Mineral | Aceite de Silicona | Éster Sintético | Éster Natural |
|--------------------|----------------|--------------------|-----------------|---------------|
| Aceite Mineral | X | Miscible | Miscible | Miscible |
| Aceite de Silicona | Miscible | X | No Miscible | No Miscible |
| Éster Sintético | Miscible | No Miscible | X | Miscible |
| Éster Natural | Miscible | No Miscible | Miscible | X |

Nota. Tomada de Piñeros (2015)

Figura 2

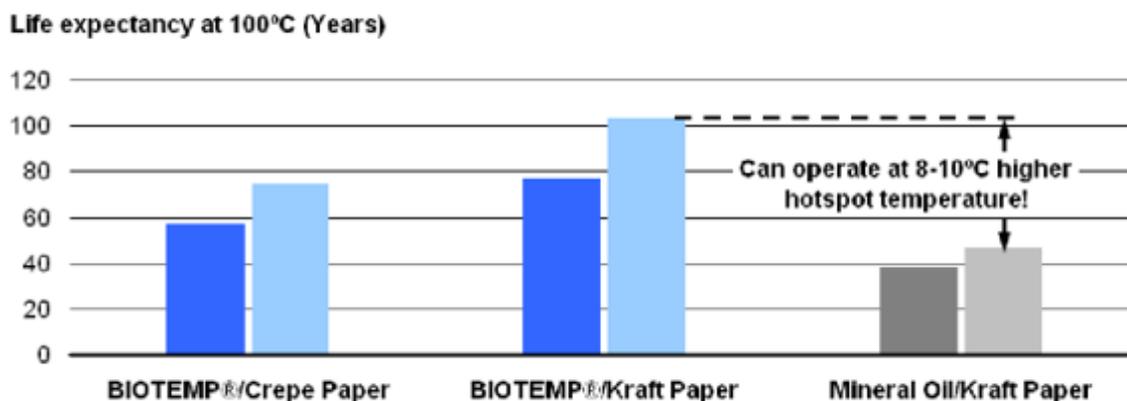
Biodegradabilidad de los líquidos aislantes



Nota. Tomada de Piñeros (2015)

Figura 3

Expectativa de vida en años



Nota. Tomada de Piñeros (2015)

mediante la realización de numerosas pruebas de acuerdo a normas internacionales. En la siguiente tabla se presenta un comparativo resumen de los valores obtenidos de las hojas técnicas de los diferentes fluidos de este parámetro (Tabla 7).

Rigidez dieléctrica en pruebas de impulso

En cuanto a la rigidez dieléctrica en pruebas de impulso entre el aceite mineral y vegetal, la norma ASTM D 3300 permite para el aceite mineral un valor de 145 kV y para el aceite

Figura 4

Estudios de envejecimiento del papel Kraft



Nota. Tomada de Piñeros (2015)

vegetal disminuye el valor a 130 kV, ambos presentan valores aceptables. En esta parte juega un papel importante el contenido de humedad ya que puede producir un efecto de conducir la electricidad debido a la disminución de la distancia entre el agua y otras partes que en este punto conducen y puede saltar el arco de un lugar a otro.

Análisis del comportamiento térmico del transformador monofásico tipo poste sumergido en aceite dieléctrico vegetal y mineral

Transferencia de calor por Conducción

La conducción puede definirse como la propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos a distintas temperaturas. El medio a través del cual la conducción ocurre en forma íntegra es en el sólido. En los medios líquido o gaseoso, a menos que se esté prácticamente con cero energías cinéticas en las moléculas, el impacto de la conducción en la transferencia de calor es mínimo. En este caso, la convección es el mecanismo de transferencia más significativo.

De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, al tenerse la situación anterior, la transferencia de calor se llevará a cabo desde la región con la temperatura mayor hacia la región con la temperatura menor. La ecuación más básica para la conducción de calor, conocida como la ley de Fourier de conducción de calor, establece que la cantidad de calor por unidad de área que fluye de un punto a una temperatura T_1 , a otro con una temperatura T_2 , en la dirección X .

Tabla 7

Comparación de las tensiones de ruptura de líquidos aislantes

| Normas | Líquido aislante | | | | |
|--------------|------------------|-----------------|---------------|--------------------|------------------------------------|
| | Aceite mineral | Éster sintético | Ester natural | Aceite de silicona | Aceite de silicona baja viscosidad |
| IEC60156 | >70 kV | >75 kV | >75 kV | 50 kV | 70 kV |
| ASTM1816 1mm | * | * | 37 kV | * | * |
| ASTM1816 2mm | 60 kV | 56 kV | 56 kV | * | * |
| ASTM D877 | 55 kV | 43 kV | 45 kV | 43 kV | * |

Transferencia de calor por convección

Es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas) y está íntimamente relacionado con su movimiento. Generalmente, el movimiento del fluido es en dirección paralela a una superficie sólida, a través de la cual, el fluido cede o absorbe calor. Para que exista el flujo de calor, debe haber una diferencia de temperaturas entre el fluido y el sólido (Figura 5).

Hay dos clasificaciones del fenómeno de convección: la convección forzada y la convección natural. La primera se da cuando el movimiento del fluido se debe a la acción de algún agente externo, como una bomba, un abanico, o situaciones ambientales. En este caso, se fuerza el movimiento del fluido sobre la superficie, presentándose una velocidad del fluido que, dependiendo de la geometría de la superficie expuesta, da origen a que se establezca un flujo laminar o un flujo turbulento. La segunda clasificación se presenta al estar el fluido en presencia de zonas a diferentes temperaturas, lo cual provoca cambios de densidades en el mismo, ocasionando un movimiento natural de las zonas de mayor a menor densidad. Comúnmente, el régimen de fluido que se establece para la convección natural o libre es laminar (Valdés Cruz, 1993).

Transferencia de calor por radiación

Es la emisión de ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz representan en temperaturas elevadas un mecanismo de pérdidas de calor. En los transformadores la transferencia de calor a través del tanque y las aletas es por radiación.

Análisis de resultados

El cálculo de la transferencia de calor no ha sido posible debido a falta de datos, sin embargo, se tomará como referencia la investigación realizada por Torregoza, et. al. (2018) en la que utiliza el programa COMSOL Multiphysics para evaluar el comportamiento térmico del

Figura 5

Ciclos de Transferencia de Calor en el Transformador



transformador utilizando aceite mineral y lo comparan con el vegetal, los resultados que obtuvieron se muestran en la Figura 6.

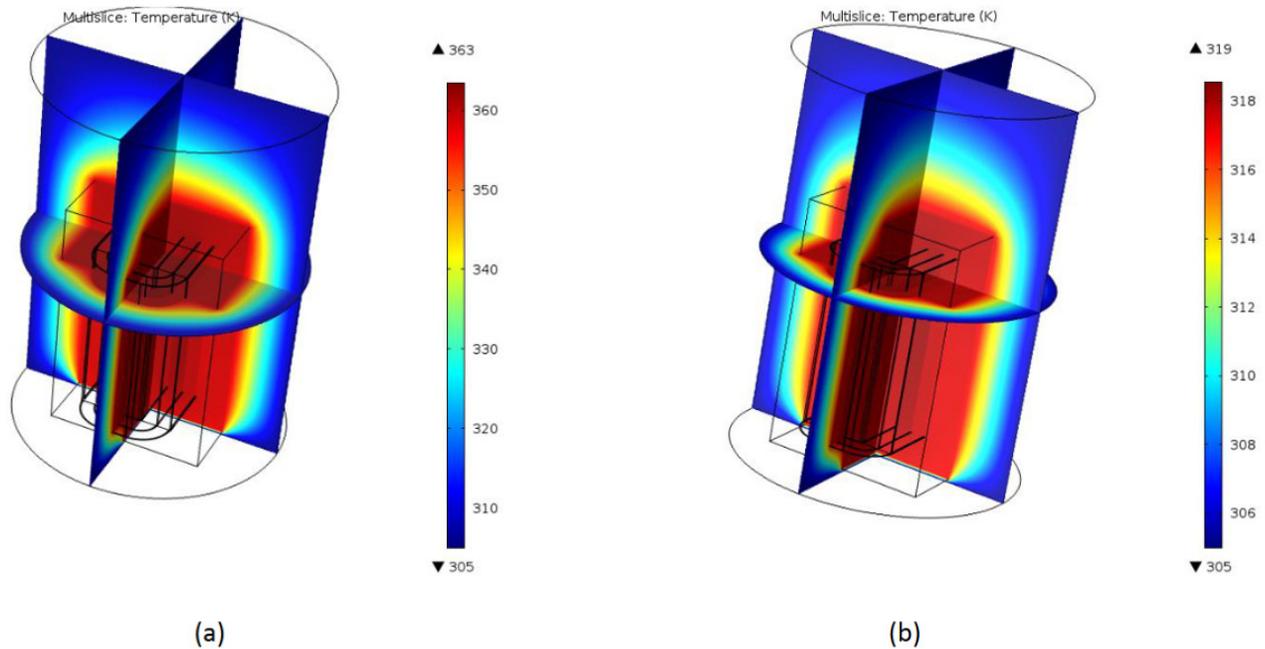
En la Figura 6 se observa un valor máximo de temperatura de 363 K (89.85 °C) para el aceite vegetal y de 319 K (45.85 °C) para el aceite mineral. Estas temperaturas máximas representan una relación de un 113 % del aceite vegetal con respecto al mineral, es decir 44 grados más en el aceite vegetal como punto mínimo de temperatura. Para ambos casos se tiene un valor de 306 K (31.85 °C), esto corresponde a la temperatura ambiente del entorno.

Para el caso del aceite vegetal, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima es de 57 grados, mientras que para el caso del aceite vegetal sólo llega a 13 grados.

En el caso del núcleo del transformador, su parte externa presenta valores cercanos a los 350 K en el aceite vegetal y de 316 K en el mineral. Una diferencia que supone 34 grados entre ambos valores y que en el caso del aceite mineral supone sólo 2 grados menos que su máxima temperatura, mientras que en el del aceite vegetal supone 13 grados, lo que puede estar relacionado con una mayor capacidad térmica del aceite vegetal y la baja viscosidad del aceite mineral. Esto último permite al aceite mineral moverse más fácilmente entre las distintas partes del transformador y la mayor capacidad térmica del aceite vegetal, permite

Figura 6

Comportamiento térmico (a) vegetal (b) mineral



Nota. Obtenido de Torregroza (2018)

que el calor sea transferido con mayor velocidad al aceite desde las partes activas del equipo, posteriormente a la cuba y finalmente sea disipado hacia el exterior.

CONCLUSIONES

En los últimos años se han empezado a buscar alternativas al aceite mineral como medio refrigerante, tal es el caso del aceite vegetal, el cual mediante un análisis realizado se muestra que contiene las propiedades idóneas para poder ser usado en transformadores, características como bajo punto de inflamabilidad, cero daños al medio ambiente y mayor extensión de la vida útil del papel Kraft, lo hacen parecer el más adecuado para su implementación. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el diseño adecuado para este tipo de fluido y así lograr el mejor rendimiento posible.

REFERENCIAS

- Cicuéndez Simonneau, E. (2012). *Estudio fluido-térmico de varios aceites de silicona en un transformador de potencia*. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/1371>
- Huillca Cameron, B. (2015). *Técnicas de alta tensión*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Martínez Amaya, W. S., Ramírez Sorto, L. M., & Soto Hernández, P. A. (2014). *Evaluación térmica en transformadores de potencia cargabilidad y efectos en la vida del sistema de aislamiento* [Engd, Universidad de El Salvador]. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6538/>
- Piñeros, J. (2015). *Fluidos Esteres: Una solución innovadora para Transformadores de Potencia*. <https://new.abb.com/docs/>

librariesprovider78/chile-documentos/
novenas-jornadas-tecnicas-2015/pp/
jose-pi%C3%B1eros---fluidos-esteres.
pdf?sfvrsn=2

Revista Electricidad. (2018). Aceite mineral es el más usado para los transformadores de alta tensión. *Revista Electricidad*, 221. <https://www.revistaei.cl/reportajes/aceite-mineral-mas-usado-los-transformadores-alta-tensaceite-mineral-es-el-mas-usado-para-los-transformadores-de-alta-tension-ion/>

RTE de Mexico. (2013). Partes Constructivas de Transformadores RTE. *RTE*. <https://rte.mx/partes-constructivas-de-los-transformadores>

SIGET. (2003). *301-E-2003 Normativa de Materiales y Equipos para Construcción de Líneas Aéreas y Sus Anexos*.

Torregozza, M. I., Arrieta, E. M., & Florez, L. E. (2018). *Comportamiento Térmico de Transformadores Eléctricos de Distribución Inmersos en Aceite Dieléctrico de Origen Vegetal*. http://www.advancesincleanerproduction.net/7th/files/cessoes/6B/8/torregozza_et_al_academic.pdf

Valdés Cruz, J. C. (1993). *Análisis de transferencia de calor en transformadores con la técnica de elementos finitos*. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/568914>

Esta página está dejada intencionalmente en blanco



DOI: 10.5377/revminerva.v6i2.17085

Nota Técnica | Technical Report

Diseño e Implementación de un Generador de Huecos de Tensión para Pruebas de Robustez

Design and Implementation of a Voltage Dip Generator for Robustness Tests

Byron Cantor Pérez¹

Cristóbal Isaías Chafoya Castro¹

Víctor Salomón Sagastume Peñate¹

Josué Giovanni Lúe González¹

José Roberto Ramos López¹

Correspondencia
byron.cantorperez.sv@ieee.org

Presentado: 23 de enero de 2023
Aceptado: 26 de mayo de 2023

¹ Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Los huecos de tensión (también llamados sags o dips) son uno de los fenómenos eléctricos más comunes existentes en la red eléctrica, y consiste en la reducción del valor eficaz de tensión durante un breve periodo. Ya que a los fabricantes de equipos eléctricos y electrónicos se le exige cierta tolerancia a este fenómeno eléctrico. Se requiere de un dispositivo capaz de generar huecos de tensión de forma controlada fuera de la red eléctrica, con el propósito de poder realizar pruebas de robustez y verificar que se cumplan las normativas que caracterizan el fenómeno como lo serían SEMI-F47, CBEMA y la curva ITIC. Teniendo en consideración lo anterior, se diseñó y construyó un equipo capaz de generarlos, y de alimentar una carga que demande una corriente considerable haciendo uso de equipo con suficiente capacidad para suministrar energía, y con a la opción de establecer parámetros como la magnitud, tiempo y velocidad de lectura de datos, mediante una interfaz gráfica intuitiva que fue diseñada mediante LabVIEW. A pesar de que existen pequeñas limitantes, estos equipos pueden ser despreciados si se tiene en consideración que el coste de implementación es hasta seis veces más económica que la opción comercial más barata existente en el mercado. El dispositivo puede ser utilizado para equipos que demanden 1 kVA.

Palabras Clave: generador de SAGS, bajo costo, curva ITIC, curva CBEMA, SEMIF47, LabVIEW

ABSTRACT

Voltage dips (also called sags) are one of the most common electrical phenomena existing in the electrical network, which consists of the reduction of the effective value of voltage for a short period of time. Since manufacturers of electrical and electronic equipment are required to have a certain tolerance to this electrical phenomenon, a device

capable of generating voltage dips in a controlled manner outside the electrical network is required, to be able to carry out robustness and verify that the regulations that characterize the phenomenon such as SEMI-F47, CBEMA and the ITIC curve are complied with. Considering the above, a device was designed and built that can generate them, being capable of feeding a load that demands a considerable current using equipment with sufficient capacity to supply energy and having the option of establishing parameters such as the magnitude, time and speed of reading data using an intuitive graphical interface that was designed using LabVIEW. Even though there are small limitations that are mentioned in this article, they can even be neglected if one takes into consideration that the cost of this implementation is up to six times cheaper than the cheapest commercial option on the market. The device can be used for devices that demand 1 kVA.

Keywords: SAGS generator, Low cost, ITIC curve, CBEMA curve, SEMIF47, LabVIEW

INTRODUCCIÓN

Los huecos de tensión, también conocidos como sags o dips, son las perturbaciones más comunes en la red eléctrica, y puede tener graves consecuencias para los equipos sensibles que no estén adecuadamente protegidos, hasta el punto en que un proceso industrial se detiene. Existen normativas que establecen que los equipos eléctricos y electrónicos deben poseer cierta tolerancia ante estos eventos, siendo mencionadas en este artículo las de (ITIC, 2000) y de (SEMI, 2006).

Es primordial poseer un equipo capaz de generarlos de forma controlada fuera de la red eléctrica, con diferentes amplitudes y duración, para tener mayor facilidad de estudiar el fenómeno eléctrico y poder comprobar la resistencia de equipos sensibles. Las pruebas son guiadas con el generador de SAGS de normativas como SEMIF47 (SEMI, 2006) y CBEMA (ITIC, 2000), y sus curvas de tolerancia. En este artículo se presenta el diseño e implementación de un generador de huecos de tensión, que

se basa en el uso de una tarjeta adquisidora de datos NI USB 6008 (National Instruments, 2008) que se utiliza para controlar el generador y, valga la redundancia, adquirir datos mediante una interfaz gráfica realizada con LabVIEW. El generador utiliza un transformador variable, fusibles, y componentes electrónicos como SSR y transistores 2N2222.

Se tienen como objetivos que el generador tenga un coste más bajo que los de uso comercial, siendo capaz de poder establecer la magnitud y duración de estos mediante una interfaz gráfica que debe de ser intuitiva, y que el usuario pueda visualizar datos relevantes, como valores RMS y gráficas relacionadas a las curvas de las normativas SEMI F47 y a la CBEMA.

METODOLOGÍA

Acerca de los huecos de tensión

Los huecos de tensión, también conocidos como sag o dip, son de las perturbaciones más importantes que puede afectar a la mayoría de los equipos electrónicos sensibles. Organismos internacionales como IEEE e IEC definen estos eventos como:

Según IEEE: es la disminución en el valor RMS del voltaje entre 0.1 p.u y 0.9 p.u para duraciones de 0.5 ciclos a 1 minuto (IEEE, 2019). Estos a su vez se pueden clasificar según como lo describe la Tabla 1.

Según IEC: es “una repentina reducción del voltaje en un punto particular de un sistema de suministro de electricidad, por debajo de un límite de caída especificado seguido por su recuperación después de un breve intervalo” (IEC, 2017).

Las principales causas de los huecos de tensión son los cortocircuitos provocados por fallas en la red, lo que ocasiona una caída brusca y posterior recuperación rápida una vez resuelta la falla. Existen otras razones por las cuales pueden existir estas perturbaciones, como lo sería el arranque de grandes motores o la energización

Tabla 1

Clasificación de los SAGS de tensión

| Variación | Duración | Magnitud |
|--------------|------------------------|-----------|
| Instantáneos | 0.5 a 30 ciclos | 10% - 90% |
| Momentáneos | 30 ciclos a 3 segundos | 10% - 90% |
| Temporales | 3 segundos a 1 minuto | 10% - 90% |

Nota. Elaborado mediante datos tomados de "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", in IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009), vol., no., pp.1-98, 13 Aug. 2019, DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486

de transformadores. Estos últimos generan huecos de tensión de forma no rectangular, pues a pesar de tener una caída de tensión brusca, su recuperación es paulatina (Dugan et al., 2002). Sin embargo, los originados por la energización de transformadores tienen la característica de inyectar armónicos, siendo esta característica la que los distingue de los huecos generados por el arranque de grandes motores de inducción (Tan & Ramachandaramurthy, 2015).

Normas de calidad de potencia: Se exige que los equipos cumplan con estándares de los huecos de tensión, por lo que los fabricantes de equipos deberán incorporar tolerancia en sus equipos. Algunos estándares para mencionar son las normativas SEMI-F47 (SEMI, 2006), CBEMA y la curva ITIC (ITIC, 2000).

Normativa SEMI F47: Según (SEMI, 2006), se requiere que los equipos toleren los huecos de tensión de forma que:

50 % voltaje restante, 50 % voltaje perdido, durante 200 milisegundos.

70 % voltaje restante, 30 % voltaje perdido, durante 500 milisegundos.

80 % voltaje restante, 20 % voltaje perdido, durante un segundo.

Considerando estos requerimientos, es como se forma la curva de tolerancia SEMI F-47, cuya

representación se aprecia en la figura 1. Esta figura posee dos ejes, el horizontal en el que está la duración del hueco y el vertical que es la magnitud de la tensión. Los fabricantes deben garantizar que los equipos tengan la tolerancia para poder funcionar sin problema estando encima de la curva.

Curva ITIC (normativa CBEMA): La norma CBEMA96 en la actualidad se utiliza para definir la calidad de energía. Cataloga como eventos a los huecos de tensión que están sobre el 10 % de caída. Según (ITIC, 2000), se permite:

Caídas al 80 % del valor nominal con una duración típica de hasta 10 segundos.

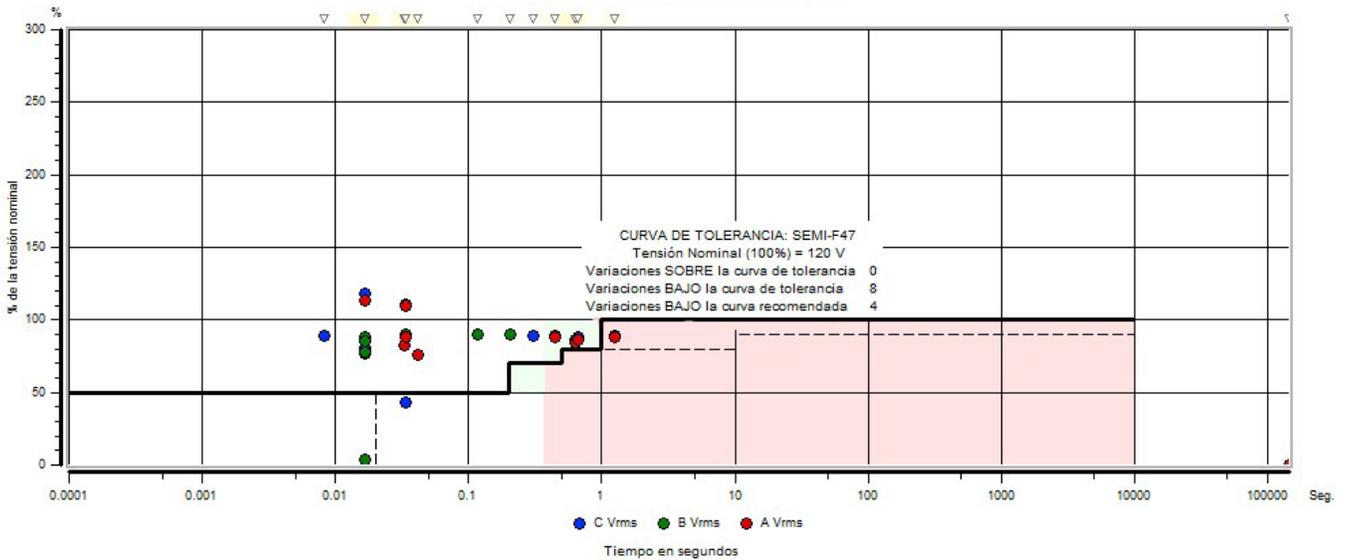
Caídas al 70 % del valor nominal con una duración de hasta 0.5 segundos.

Igual que la normativa SEMI F-47, existe una curva de tolerancia que se ve representada en la figura 2. La novedad es que es evidente son dos curvas. La curva superior sirve para análisis de sobretensiones, mientras que la inferior es para el análisis de los huecos de tensión, siendo esta última interpretada de la misma forma que la SEMI F-47.

Curva ITIC (normativa CBEMA): La norma CBEMA96 en la actualidad se utiliza para definir la calidad de energía. Cataloga como eventos a los huecos de tensión que están sobre el 10 % de caída. Según (ITIC, 2000), se permite:

Figura 1

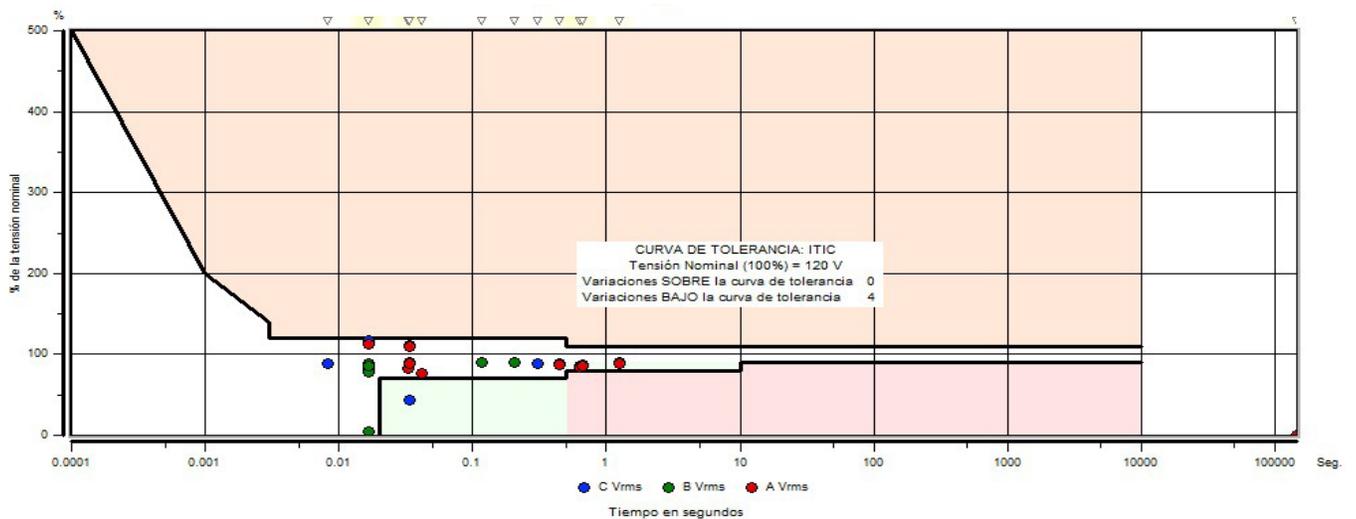
Curva de SEMI F-47 Diagrama de magnitud/duración



Nota. Figura obtenida del analizador de energía PowerGuide® 4400 (DRANETZ, 2005), en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

Figura 2

Curva ITIC (CBMEA) diagrama de magnitud/duración



Nota. Figura obtenida del analizador de energía PowerGuide® 4400 (DRANETZ, 2005), en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

Caídas al 80 % del valor nominal con una duración típica de hasta 10 segundos.

Caídas al 70 % del valor nominal con una duración de hasta 0.5 segundos.

Igual que la normativa SEMI F-47, existe una curva de tolerancia que se ve representada en la figura 2. La novedad es que es evidente son dos curvas. La curva superior sirve para análisis de sobretensiones, mientras que la inferior es para el análisis de los huecos de tensión, siendo esta última interpretada de la misma forma que la SEMI F-47.

Diseño de generador de huecos de tensión para pruebas de robustez

Para el diseño, se tomó como referencia los artículos realizados por (Senturk & Hava, 2010), (Ma & Karady, 2008) y (Yang et al., 2012). Además, fue consultado el texto de (Horowitz & Hill, 2015) para el desarrollo del generador de huecos de tensión.

El equipo generador de huecos de tensión diseñado es capaz de intercambiar dos señales con distinta tensión en distintos tiempos, con misma frecuencia y fase, es capaz de alimentar una carga que demande una corriente considerable por lo que se utilizó un equipo con suficiente capacidad para suministrar energía.

La entrada de voltaje del equipo, generador de huecos de tensión, alimenta un transformador variable (VARIAC), modelo TDGC-2 KM, el cual recibe 110 V@60Hz y es capaz de entregar tensiones desde 0 V hasta 130 V@60Hz, posee un dial capaz de regular la tensión en sus terminales de salida. El VARIAC puede proporcionar una salida máxima de hasta 20 A. Mediante el VARIAC se entrega la tensión reducida, la cual pasará por SSR que son controlados desde un software, desarrollado en LabVIEW, y se comunica a través de una tarjeta de adquisición de datos que controla los transistores a una etapa de control, proporcionando precisión a la hora de generarlos.

De acuerdo con la metodología, el equipo generador, de huecos de tensión, fue diseñado en dos partes: el hardware y el software. Cada una de ellas se describirá a continuación

Descripción de la implementación del hardware:

En la figura 3 podemos observar el diagrama del generador de huecos de tensión, diseñado para proteger de daños a dispositivos bajo pruebas de robustez y al mismo equipo, por lo que se están utilizando protecciones para la alimentación principal y en la salida de los relés de estado sólido (SSR). Para el correcto funcionamiento del equipo, se diseñó un sistema que es capaz de combinar dos señales con diferentes amplitudes sin que se generen problemas eléctricos, a través de un SSR que funciona como transición entre las dos señales. Se logra identificar una etapa de control, una etapa de potencia y una etapa de medición. Cada una de estas etapas serán brevemente descritas:

1. La etapa de control: se tiene un rectificador de onda completa, un capacitor y un integrado que logran dar una señal de 12 V_{DC}. Para controlar los tres SSR, se hace uso de los puertos P0.0, P0.1 y P0.2 del dispositivo NI USB 6008 (National Instruments, 2008) con el objetivo de abrir y cerrar conexiones mediante transistores.
2. La etapa de potencia: se utilizan tres SSR para manejar tres señales distintas, señal normal de AC (SSR1), señal de salida del autotransformador (SSR2) y señal de transición (SSR3), conectadas todas a la misma salida. En la figura 3 se puede apreciar la existencia de tres LEDs indicadores, dos para los SSR y uno conectada a la tarjeta de adquisición de datos.
3. Etapa de medición: para poder mostrar en la pantalla del software el dato exacto de tensión que se está introduciendo a la carga, es necesario medir con un transformador, el cual reduce la tensión a valores que pueden ser introducidos directamente a la NI USB 6008 (National Instruments, 2008).

Voltage SAGS Simulator, abreviado VSS 1.0, es la primera versión de un programa de software libre implementado haciendo uso de LabVIEW para el control del generador de huecos de tensión. LabVIEW es un entorno de programación gráfica de ingeniería, siendo su diseño ideal para aplicaciones que requieren mediciones, control y acceso rápido a información de datos virtuales o que se obtienen de algún dispositivo compatible con el programa, como lo serían las tarjetas de adquisición de datos NI USB 6008 (National Instruments, 2008).

El funcionamiento de VSS 1.0 se segmenta en seis etapas fundamentales:

1. Parámetros iniciales: la primera función al ser ejecutada es la comunicación directa entre LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos. Se crean cuatro canales de comunicación, declarando salidas digitales los puertos P0.0 al P0.3, siendo los primeros dos para las SSR.

2. Mediciones en tiempo real: los datos serán obtenidos por los puertos A0±, A1± de la tarjeta de adquisición de datos, los cuales miden la tensión instantánea.

3. Etapa generadora de SAGS: los puertos digitales enviarán series de pulsos que activen y desactiven los SSR para que la tensión pase de condición normal a una de menor magnitud.

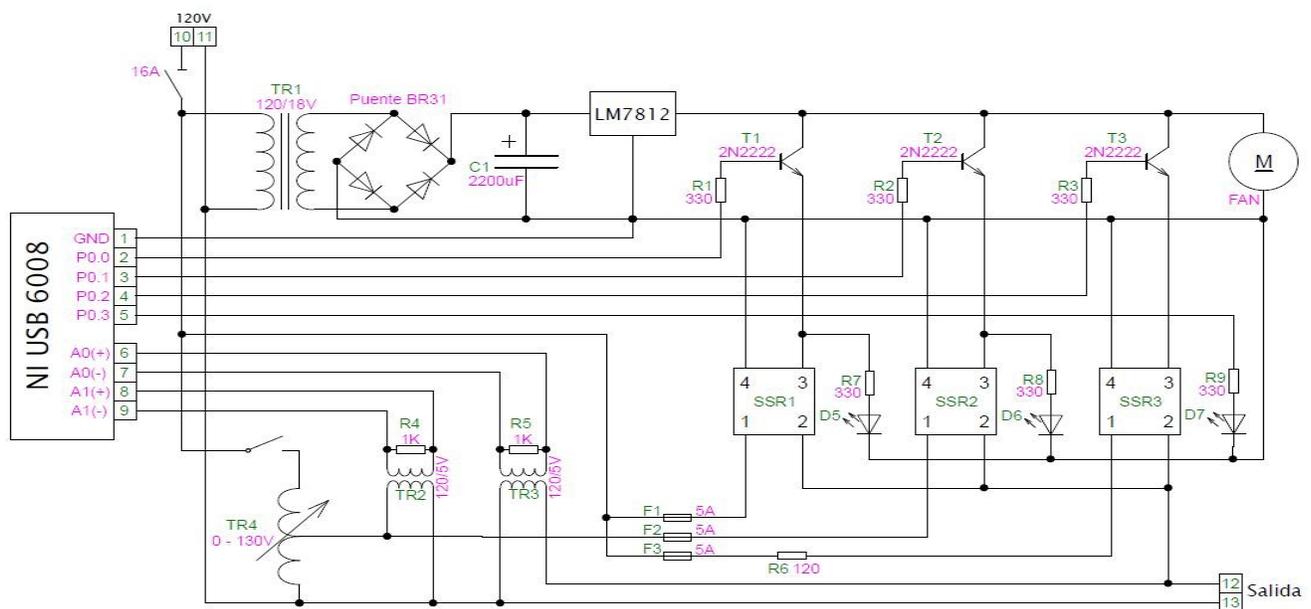
4. Almacenamiento de datos en archivos: los datos serán magnitudes RMS, y este almacenamiento terminará cuando el usuario decida accionar el botón "Detener Mediciones".

5. Procesamiento de datos: durante la ejecución, la interfaz de usuario solo mostrará valores a tiempo real de las mediciones de tensión del VARIAC y de las terminales de carga del generador de SAGS y sus respectivos valores RMS. Finalizado el programa, también se mostrarán otros datos que pueden ser de interés, incluyendo dos gráficas relacionadas a curvas de normativas mencionadas.

6. Interfaz gráfica: el usuario puede interactuar con el programa, ingresando datos y configuraciones avanzadas. Si el programa encuentra un error, se detendrá o aparecerá un mensaje.

Figura 3

Diagrama del generador de huecos de tensión



Construcción de generador de SAGS y presupuesto estimado

Con el diagrama unifilar presentado antes, se procedió a realizar la construcción física (Figura 4 y 5). Se utilizó una caja metálica de 8×6×12 chapa 14, sin perforaciones en el cual se colocarán todos los dispositivos utilizados para el generador de SAGS monofásico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El equipo generador de huecos de tensión es capaz de generarlos sin limitante en magnitud (Figura 6), siendo capaz de asignarle un tiempo de duración. Existen limitantes, como que la duración se limita a periodos de tiempo de

semiciclos completos. Debido a cuestiones de seguridad con respecto a los SSR, el programa no puede generar huecos menores a los 23 milisegundos. Los parámetros de los huecos de tensión pueden ser modificados mediante el software VSS 1.0. En el panel frontal se encuentran cinco pestañas (Figura 7).

En la pestaña de configuración se puede definir el tiempo de duración del hueco de tensión (SAG) en milisegundos o en ciclos, y a su vez se puede dar un pequeño tiempo de “delay” para que inicie el hueco de tensión, además de otras configuraciones (Figura 8).

A su vez, el programa permite visualizar datos relevantes, como lo serían valores RMS y gráficas

Figura 4

Interior del equipo generador de SAGS monofásico construido



Figura 5

Exterior del equipo generador de SAGS monofásico construido



Nota. Vista lateral izquierda, vista lateral derecha y vista frontal, respectivamente..

Figura 6

Hueco de tensión producido con el generador, capturado con un osciloscopio

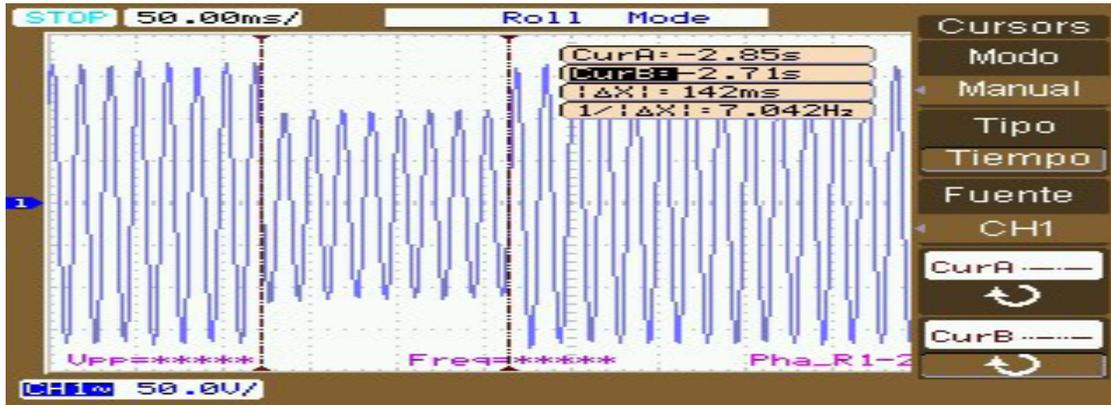


Figura 7

Hueco Interfaz gráfica del software VSS, versión 1.0



Figura 8

Pestaña de configuración del software

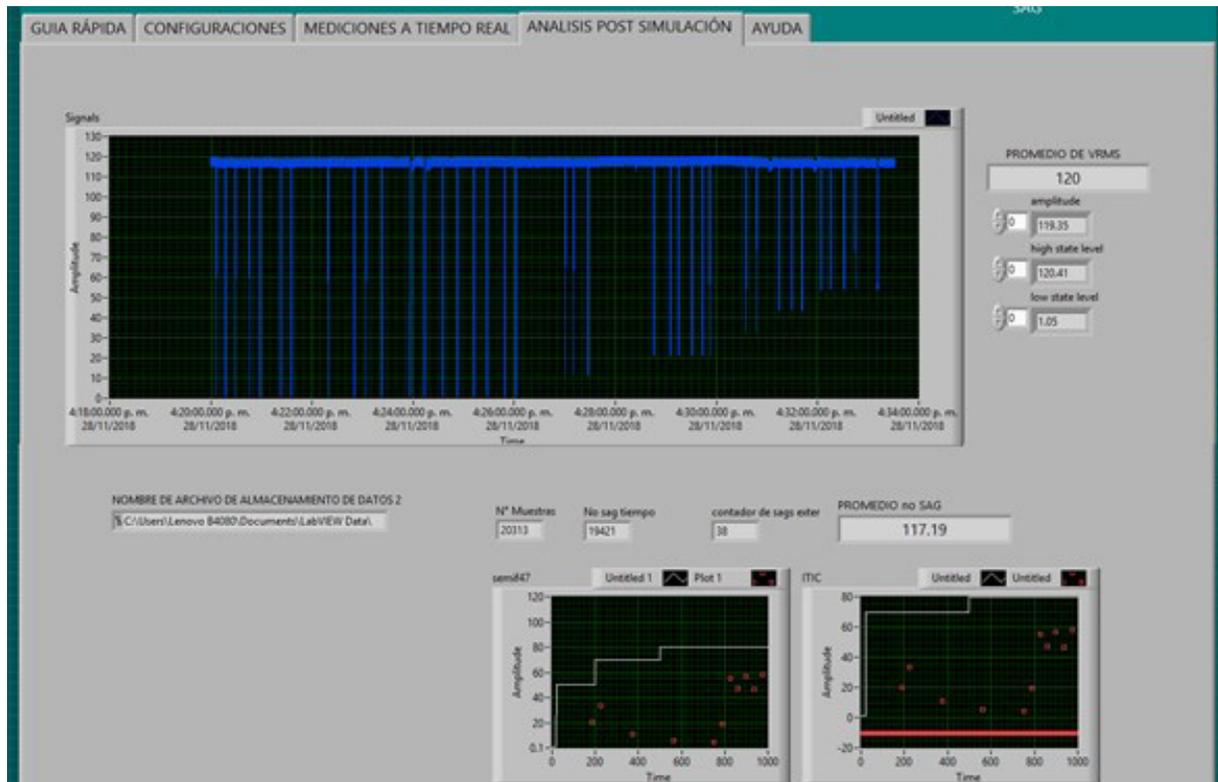


relacionadas a las curvas de las normativas SEMI F47 y a la CBEMA. La velocidad de lectura de datos dependerá del número de muestras que se establezca, por lo que existirá incertidumbre con los tiempos dados (Figura 9).

que el comercial más económico se encontró en USD 4128.00 (precios de septiembre 2022), siendo una opción viable a pesar de algunas limitantes existentes.

Figura 9

Pestaña de análisis post simulación



Para la construcción del generador de SAGS se tuvo que implementar varios elementos, los cuales se enlistan a continuación, junto con una estimación de sus costos.

Para la estimación de precios, se cotizó en comercios existentes a nivel nacional (Tabla 2). Para el caso en que cierto artículo no se encontrara disponible a nivel nacional, se cotizaron precios en sitios web. Realizando una breve investigación, se encontró que el equipo generador comercial más económico es el modelo VDT S100 (emcsosin, 2021), cuyo precio se cotizó en USD 4128.00

El equipo generador de huecos de tensión

comercial posee mayores características para facilitar el análisis de estos fenómenos, pero en lo que respecta a la capacidad de generar huecos de tensión se puede afirmar que no existen diferencias que puedan considerarse en lo que respecta a aspectos como la corriente de salida. Existen ligeras diferencias a considerar, como que la tensión de alimentación del generador comercial es de 240V.

CONCLUSIONES

Si se compara con productos comerciales, el generador de SAGS construido llega a ser al menos seis veces más económico, ya que su implementación cuesta USD 708.65, mientras

Tabla 2
Elementos utilizados y presupuesto estimado en USD (septiembre 2022).

| Unidad | Elemento | Coste unidad USD | Coste total USD |
|--------------|--|------------------|-----------------|
| 1 | Interruptor termomagnético de 16 A | 5.50 | 5.50 |
| 3 | Fusible tipo americano de 10 A | 0.24 | 0.72 |
| 1 | Transformador variable TDGC-2 KM | 221.18 | 221.18 |
| 1 | Transformador de alimentación LP-433, 120/18V @ 1 A | 15.00 | 15.00 |
| 2 | Transformador de medición, 120/5 V | 15.00 | 30.00 |
| 1 | Puente rectificador de onda completa BR-3. | 0.20 | 0.20 |
| 1 | Capacitor radial 2200nF, 25V | 0.70 | 0.70 |
| 1 | Regulador de tensión LM7812 | 1.60 | 1.60 |
| 3 | Transistores BJT 2N2222 | 1.25 | 3.75 |
| 3 | Relé de Estado Solido 120V@10A | 10.00 | 30.00 |
| 1 | Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008 | 300.00 | 300.00 |
| 1 | Otros gastos (materiales secundarios, logística, etc.) | 100.00 | 100.00 |
| TOTAL | | | 708.65 |

Al equipo base que se expuso acá se le pueden realizar algunos cambios de componentes según las necesidades requeridas. Para nuestro caso, el equipo generador diseñado fue enfocado a equipos que puedan demandar una cantidad significativa de potencia, siendo de hasta 1kVA.

El generador de huecos de tensión que fue implementado tiene la capacidad de generar SAGS cuya magnitud sea de incluso hasta 0 % de tensión, y la asignación del tiempo de duración puede ser la que sea necesaria, logrando cumplir lo explicado en la norma IEEE std. 1159.

El panel de control del programa VSS 1.0 llega a ser muy intuitivo y fácil de utilizar, estando claramente indicados los datos de interés a ingresar y también existiendo dentro del programa un instructivo con los pasos necesarios a seguir para el manejo básico del programa. Por medio del programa se pueden observar valores como la tensión RMS y las curvas SEMI-F47 e ITIC.

REFERENCIAS

- DRANETZ. (2005). PowerGuide® 4400 USER'S GUIDE.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2002). Electrical Power Systems Quality (Second). McGraw-Hill.
- emcsosin. (2021). Single phase 10A cycle drop generator VDT S10.
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). The art of electronics (3rd ed.). Cambridge University Press.
- IEEE. (2019). 1159-2019 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality | IEEE Standard | IEEE Xplore. IEEE Std 1159-2019.
- Information Technology Industry Council (ITIC). (2000). ITIC (CBEMA) curve application note.
- International Electrotechnical Commission. (2017). Electromagnetic compatibility

(EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests. International Standard, 1.

Ma, Y., & Karady, G. G. (2008). A single-phase voltage sag generator for testing electrical equipments. Transmission and Distribution Exposition Conference: 2008 IEEE PES Powering Toward the Future, PIMS2008. <https://doi.org/10.1109/TDC.2008.4517185>

National Instruments. (2008). User Guide and Specifications: USB-6008/6009. System, 1-32. <https://doi.org/371303L-01> May08

SEMI. (2006). Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity. SEMI F47-0706.

Senturk, O. S., & Hava, A. M. (2010). A simple sag generator using SSRs. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 - Proceedings. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2010.5618292>

Tan, R. H. G., & Ramachandaramurthy, V. K. (2015). A Comprehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using MATLAB/SIMULINK. In Power Quality Issues in Distributed Generation. <https://doi.org/10.5772/61209>

Yang, Y., Blaabjerg, F., & Zou, Z. (2012). Benchmarking of voltage sag generators. IECON Proceedings. <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6389164>

Esta página está dejada intencionalmente en blanco



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>



DOI: 10.5377/revminerva.v6i2.17089

Nota Técnica | Technical Report

Integración de servicios de ciberseguridad y enrutamiento usando software libre basado en pfSense

Integration of cybersecurity and routing services using free software based on pfSense

Josue Daniel Osorto-Rivera¹

Oscar Rene Miranda Urbina¹

Carlos Osmin Pocasangre Jimenez¹

Correspondencia:
MU17001@ues.edu.sv

Presentado: 30 de enero de 2023

Aceptado: 6 de junio de 2023

¹ Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador

RESUMEN

La implementación de medidas de ciberseguridad, para cualquier lugar que requiera una conexión a Internet, es cada vez más importante, convirtiéndose no solo en un extra para los usuarios sino en una necesidad. El desconocimiento de cómo funcionan los ataques cibernéticos es la principal vulnerabilidad ante estos, por lo que la ciberseguridad se convierte en una prioridad. La implementación de redes privadas en Internet es una alternativa para aquellos proyectos que necesitan compartir datos entre conexiones remotas. Implementar una de estas redes puede ser más simple de lo que parece, ya que comprender lo que realmente son, facilita la protección de los datos de los usuarios contra ataques cibernéticos. En este artículo científico se encontrará la implementación de una red privada a través de Internet pública en el Laboratorio de Telemática de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES.

Palabras claves: Red privada virtual, firewalls, pfSense, ciberseguridad.

ABSTRACT

The implementation of cybersecurity measures for any place that requires an Internet connection is increasingly important, becoming not only an extra for users, but a necessity. Ignorance of how cyberattacks work is the main vulnerability to these, so cybersecurity becomes a priority. Therefore, the implementation of private networks on the internet is an alternative for those projects that need to share data between remote connections. Implementing one of these networks can be simpler than it seems, since understanding what they really are makes it easier to protect users from cyberattacks. In this scientific article, the implementation of a private network through the public internet in the telematics laboratory of the school of electrical engineering at UES will be found.

Keywords: Virtual private network, firewalls, pfSense, cybersecurity.

INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad de un usuario en Internet no siempre es clara para gran parte de la población mundial. Esta realidad es inminente y sobre todo peligrosa. En 2007, el ataque conocido como WannaCry infectó más de 230,000 computadoras en 150 países, en equipos con sistema operativo Windows, resultando en pérdidas de más de USD 4 mil millones (Latto, 2020).

La ciberseguridad es la práctica de proteger sistemas, redes y programas, de ataques digitales. Estos ataques generalmente tienen como objetivo acceder, modificar o destruir información confidencial; extorsionar a los usuarios o interrumpir la continuidad del negocio (CISCO, 2022a; Michalec et al., 2023).

En el pasado, no había forma de leer a través de un papel, la única forma de interceptar un mensaje era literalmente haciéndolo, pero el mundo ha cambiado más en los últimos años que en toda la historia. La comunicación se ha vuelto instantánea y versátil, ya no es necesario viajar a Japón para hablar con japoneses, ir a un restaurante para pedir comida, o incluso llamar para hacerlo, ya no es necesario ir al banco para abrir una cuenta de ahorros, etc. Sin embargo, como suele suceder, la sociedad decide tomar atajos, y hoy en día, mucha información personal y confidencial se utiliza no solo en las actividades cotidianas de una persona, sino también por grandes corporaciones para realizar gran parte de su información y finanzas. Por esta misma razón, los mayores expertos en tecnología del mundo han filtrado información de cientos de miles de personas atacando a países de primer mundo y con una fuerte cultura de ciberseguridad integrada en su día a día.

Por esta razón, se ha decidido abordar el tema desde la implementación de VPN en routers

integrados. En 2020, la razón de ataque más relevante en los Estados Unidos fue el robo o el compromiso de credenciales (IBM, 2021). La formación en estos temas, para la población en general, es necesaria porque en la historia reciente y futura, dichos ataques siempre serán una amenaza.

DESARROLLO

pfSense es un software basado en FreeBSD (sistema operativo de código abierto para computadoras) que incluye varias funciones que facilitan su uso como firewall y enrutador (Zientara, 2018). El objetivo de este software es utilizar sus funciones para crear una conexión segura utilizando VPN y firewalls para establecer y mantener un tráfico de información seguro. Entre las principales funciones de pfSense se encuentra el firewall, la traducción de direcciones de red (NAT), un proceso mediante el cual una o más direcciones locales se traducen en direcciones globales y viceversa (KeepCoding, 2022), el servidor DHCP y la VPN.

VPN

Es una red privada que crea una conexión de red entre dispositivos en Internet (Amazon Web Services, 2023). En este punto, muchas empresas se han dedicado a crear un amplio mercado de servicios VPN. Según nuevas pruebas e investigaciones (Migliano, 2023), los proveedores comerciales se especializan según el uso que el cliente le dará a la red privada, lo que significa que los proveedores no se pueden clasificar de “peor a mejor” sino, del tipo de cliente al que proveen, por ejemplo: VPN con bajo presupuesto; VPN para streaming; VPN para privacidad; etc. Por esta razón, se ha seleccionado al proveedor de VPN NordVPN.

Pero ¿exactamente, por qué usar una VPN? Según la documentación oficial del proveedor ExpressVPN, la encriptación VPN oculta la dirección IP y mezcla el tráfico de los usuarios. También encripta el tráfico del usuario al servidor. NordVPN utiliza el algoritmo de

cifrado AES-256-GCM (NordVPN, 2023). Esto muestra que no se trata solo de una red privada de servidores, estos servidores implementan medidas de seguridad. El último aspecto, pero no menos importante para decidir qué VPN usar, es que según una reciente investigación (Jones, 2023), el puerto TCP coincide con el puerto más adecuado para el área de trabajo que se implementará. Además, la fiabilidad del tráfico TCP es mayor que la del tráfico UDP.

Hardware

Al ser pfSense® un software, se necesita hardware para instalarlo o se pueden utilizar máquinas virtuales para simularlo (VirtualBox, VMware Workstation, etc.). En esta investigación, se utilizó la mini PC PROTECTLI modelo FW4B-0-4-32, que tiene 32 GB de memoria interna y 4 GB de RAM. Netgate ofrece dispositivos más económicos, como el modelo SG-1100, entre otros.

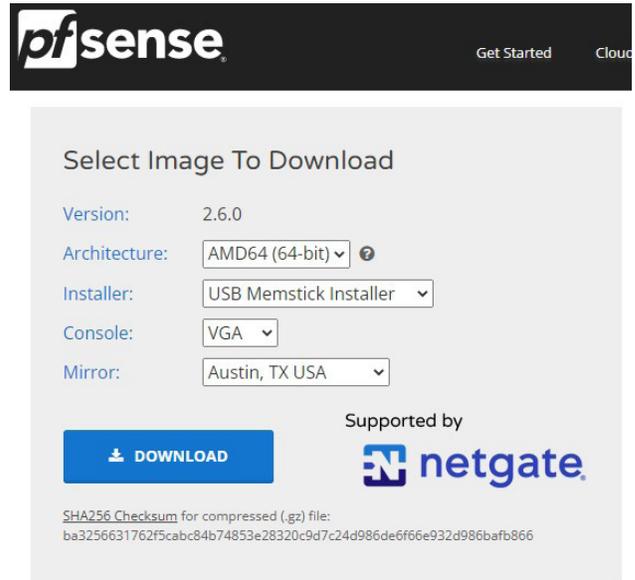
El proceso de instalación del software pfSense es similar al de cualquier sistema operativo. Se debe determinar si el software se descarga como imagen ISO o como instalador USB y luego cargarlo en un dispositivo de almacenamiento con opción USB, formateada y configurada con soporte de arranque. La Figura 1 muestra la configuración para cargar el instalador en un almacenamiento con puerto USB.

Una vez descargada la imagen de pfSense, se debe formatear y configurar un almacenamiento con opción USB y con soporte de arranque activo. Existen varios programas que cumplen esta función. En este caso, se utiliza el programa Rufus versión 3.20 para configurar la imagen de pfSense con opción de arranque, como se muestra en la Figura 2.

Debido a que la mini PC cuenta con puertos HDMI, RJ45 y USB, se recomienda conectar el almacenamiento USB a la mini PC y luego utilizar un monitor y un teclado para configurar el software de pfSense. Así mismo es importante tener en cuenta la configuración

Figura 1

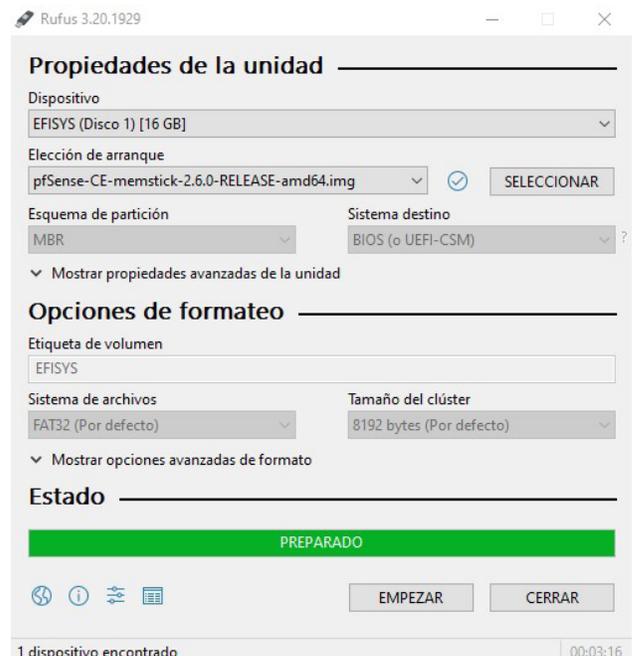
Panel de descarga de pfSense



Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de pfSense pfsense.org/download.

Figura 2

Ventana de Rufus para la configuración del dispositivo de almacenamiento.



Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

recomendada por el programa instalador de pfSense. Una vez que el software de pfSense esté en funcionamiento, se puede utilizar el modelo FW4B de la mini PC, que cuenta con cuatro puertos de red (WAN, LAN, OPT1 y OPT2), también se sugiere utilizar el puerto WAN para conectar el proveedor de Internet contratado y el puerto LAN para conectar un Switch Cisco en el que se pueden conectar varios dispositivos dentro de la red privada configurada en pfSense.

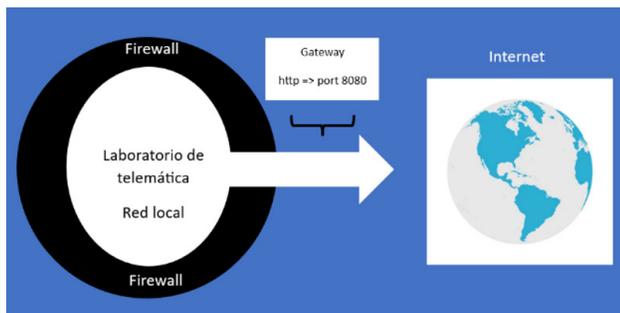
Diagramas de implementación

La estructura de ciberseguridad utilizada por algunas organizaciones se basa en la configuración de un firewall que aísla el contacto directo entre la red local y el internet, un solo puerto de salida para monitorear el tráfico entrante y saliente. Para el caso de aplicación en el Laboratorio de Telemática de la Escuela de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de El Salvador es igual, la Figura 3 identifica el estado del Laboratorio previo a nuestra intervención. En caso de que un usuario acceda a internet no cuenta con ninguna VPN salvo que exista una instalada en el dispositivo conectado que usualmente es el software que las compañías de VPN proporcionan.

En la Figura 4 se observa el diagrama con el router con VPN incorporado. El router con VPN incorporada se instalará en el puerto permitido

Figura 3

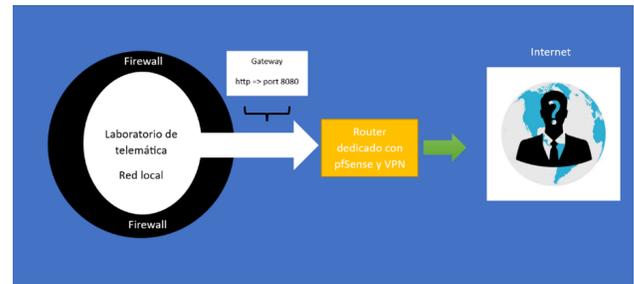
Diagrama de estado inicial de laboratorio.



Nota. Imagen ilustrativa capturada en Microsoft Word

Figura 4

Diagrama de estado final de laboratorio con router ya incorporado



Nota. Imagen ilustrativa capturada en Microsoft Word

por el firewall de la red local (este puerto depende de la organización), de esta forma, si un usuario dentro de la red local quisiera acceder a internet puede hacerlo de manera segura a través de la VPN incorporada en el router sin necesidad de instalar un software.

Configuración de pfSense

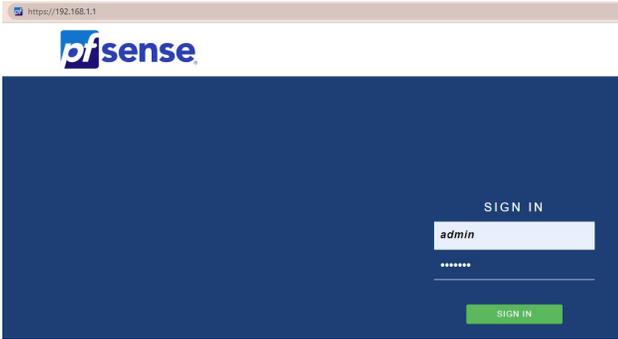
Para configurar pfSense, es importante tener en cuenta que el puerto LAN al que se conecta la PC brinda una dirección IP diferente a la proporcionada por el proveedor de Internet. Para acceder a la interfaz web de pfSense, es necesario buscar la dirección IP que se le asigna a la PC en uso mediante el servicio DHCP. En caso de utilizar Linux, se puede usar el comando "ip address". Si se utiliza Windows, existen diferentes formas de solicitar esta información, como la terminal del sistema con el comando "ipconfig" o accediendo a las configuraciones de red en la sección de propiedades de red.

El software pfSense cuenta con una configuración de red predeterminada que utiliza la dirección IP 192.168.1.0 y el gateway para acceder a la interfaz web en 192.168.1.1. Las credenciales predeterminadas para el nombre de usuario y la contraseña son "admin" y "pfense", respectivamente (Figura 5).

Al entrar en la interfaz web de pfSense se despliega una configuración inicial la cual se deja por defecto, debido a que lo que se

Figura 5

Interfaz web para autenticación de pfSense



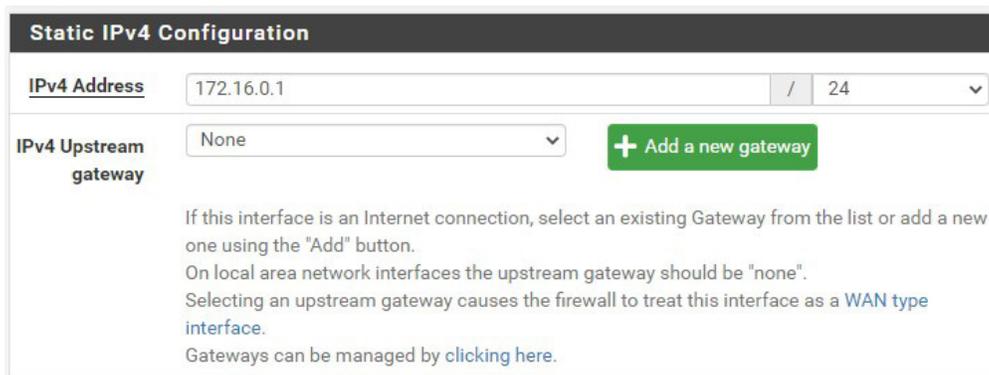
Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

pretende es tener una red privada ya que una red pública contiene direcciones IP a las cuales se puede acceder directamente desde internet, y las redes privadas permiten conectarse de forma segura a otros dispositivos dentro de la misma red. En la opción de interfaces dentro de la interfaz web se modifica la interfaz LAN modificando la dirección IPv4, que trae por defecto (192.168.1.1), por una dirección privada, existe una basta cantidad de redes privadas por lo que la dirección seleccionada puede cambiar según sea el caso. En este caso se ha tomado la dirección 172.16.0.1 con máscara 24 tal como se observa en la Figura 6.

Después de realizar la configuración inicial de pfSense, es recomendable cambiar la

Figura 6

Configuración de red privada en interfaz LAN



Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

contraseña predeterminada para mayor seguridad. Una vez finalizadas y aplicadas todas las configuraciones, es necesario actualizar la página e introducir la nueva dirección IP asignada a la red privada. Si se cambian las credenciales de acceso, es importante tener en cuenta que los cambios ya están aplicados.

Para verificar si pfSense ha realizado los cambios correctamente, se pueden utilizar los comandos mencionados anteriormente para obtener y visualizar las configuraciones de red en el ordenador. Si no se visualizan los cambios en Linux, se puede utilizar el comando “sudo dhclient -r”, mientras que en Windows se puede utilizar el comando “ipconfig /release” en la terminal del sistema. Estos comandos liberan y renuevan la dirección IP en ambos sistemas operativos, y los cambios en la configuración de red se aplicarán después de realizar esta operación.

Firewall

La importancia de migrar a un firewall en las empresas es mejorar la postura de seguridad con las capacidades más recientes para la protección de la red unificada y la microsegmentación de cargas de trabajo (CISCO, 2022b). El tablero principal de pfSense brinda información de sistema, interfaces, unidades de memoria, etc. Además, puede brindar información adicional como estado de

servicios, estado de portal cautivo, estado de firewall, información de VPN, entre otros. Todas estas opciones están disponibles desde el apartado de widgets. En este punto ya se tiene configurada la red privada y se tiene el firewall brindado por pfSense con sus configuraciones por defecto. Existen casos en los que se necesita brindar acceso en los firewalls a ciertas direcciones IP de la red, esto es posible haciendo uso de la opción “alias” dentro de la configuración del firewall, el cual se basa en agrupar según sea necesario las direcciones IP ahorrando escritura al configurar las reglas del firewall. En este caso se da acceso a un rango desde 172.16.0.5 hasta 172.16.0.15, dentro de la opción de Aliases se le asigna el nombre al grupo de direcciones IP, una descripción y se agregan las direcciones pertenecientes al grupo tal como se observa en la Figura 7.

Una vez que se ha configurado el grupo de direcciones IP, es posible establecer las reglas del firewall con mayor facilidad. Dado que estas reglas se aplican a la red privada, al configurarlas se debe seleccionar la interfaz LAN. En primer lugar, se pueden observar las reglas predeterminadas que pfSense aplica al firewall (y que no se pueden modificar). Luego, se agrega una nueva regla en la que se asigna el grupo de direcciones IP que utiliza el gateway configurado con la conexión VPN para acceder a Internet. Además, se debe proporcionar una descripción y guardar la regla, como se muestra en la Figura 8.

Al configurar la regla, se debe tener en cuenta la opción “Action”, que determina el comportamiento de la regla en el firewall. Es posible especificar, si se permite el acceso, se bloquea o se rechazan las direcciones IP. El

Figura 7

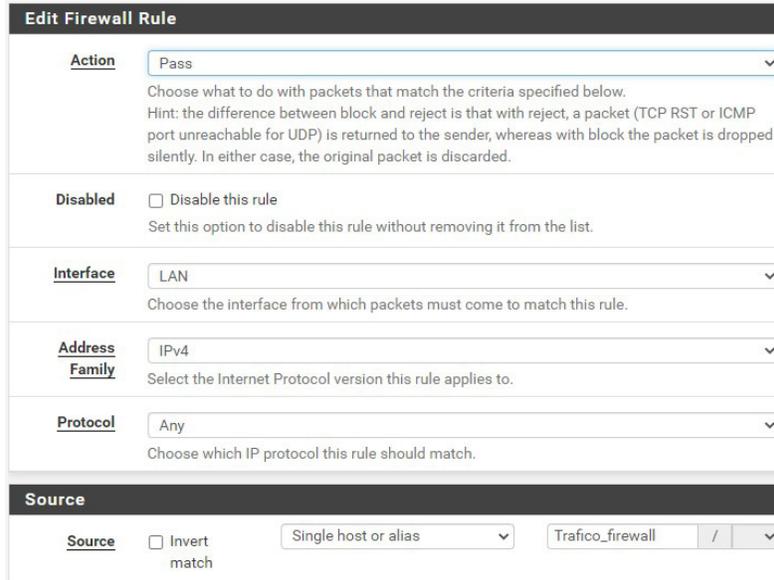
Configuración de Aliases

The screenshot shows the configuration interface for an alias in pfSense. It is divided into two main sections: 'Properties' and 'Host(s)'.
Properties Section:
 - **Name:** 'Trafico_firewall'. A note below states: 'The name of the alias may only consist of the characters "a-z, A-Z, 0-9 and _".'
 - **Description:** 'Direcciones Ip que si pueden pasar el firewall'. A note below states: 'A description may be entered here for administrative reference (not parsed).'
 - **Type:** 'Host(s)' (selected from a dropdown menu).
Host(s) Section:
 - **Hint:** 'Enter as many hosts as desired. Hosts must be specified by their IP address or fully qualified domain name (FQDN). FQDN hostnames are periodically re-resolved and updated. If multiple IPs are returned by a DNS query, all are used. An IP range such as 192.168.1.1-192.168.1.10 or a small subnet such as 192.168.1.16/28 may also be entered and a list of individual IP addresses will be generated.'
 - A table lists individual IP addresses from 172.16.0.5 to 172.16.0.15. Each row includes the IP address, the date it was added (e.g., 'Thu, 01 Dec 2022 19' for 172.16.0.5 and 'Wed, 04 Jan 2023 1t' for others), and a 'Delete' button.

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

Figura 8

Configuración de reglas dentro de firewall



Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

protocolo predeterminado en la configuración es TCP, pero se puede cambiar a cualquier otro protocolo. Luego, en las opciones avanzadas,

se debe modificar el gateway del puerto WAN y asignar el gateway configurado al servicio de la VPN. Así, se asegura que el grupo de direcciones IP tenga acceso a Internet a través de la conexión VPN establecida. Una vez que la sección del firewall está configurada y funcionando correctamente, es necesario configurar la VPN a través de la cual el tráfico de la red pasará. Una VPN es una red privada virtual que permite al usuario asegurar la actividad de la red de manera que solo sea conocida por el proveedor y el usuario. En términos simples, funciona de manera similar a una red privada doméstica, lo que significa que la información y los archivos compartidos a través de una encriptación VPN son seguros y se mantienen separados del resto de Internet.

Mercado VPN

A este punto, muchas empresas se han dedicado a crear un amplio mercado de servicios VPN. Los proveedores comerciales se

especializan según el uso que el cliente le dará a la red, esto conlleva que los proveedores no se pueden clasificar de “menor a peor” sino, del tipo de cliente al que provee ej. VPN con bajo presupuesto, VPN para streaming, VPN para privacidad, etc.

Acorde a la documentación oficial de pfSense este es compatible con varios proveedores de VPN vistos en esta tabla. El primer proveedor puesto a prueba fue PIA VPN. La especialidad de este proveedor es la privacidad, los servicios Torrent está limitado y está disponible en 84 países. Al instalar este proveedor en el router se obtuvieron problemas de desconexión impredecibles y latencia muy alta. Se entiende que es por la misma naturaleza de la aplicación de este proveedor.

Como segunda y definitiva opción el proveedor NordVPN fue utilizado, aunque su especialidad es la velocidad para los propósitos de este estudio era suficiente, además que la estabilidad que brinda NordVPN en comparación con PIA VPN en este router utilizando pfsense es considerable.

Otro inconveniente mayor es que muchos proveedores de VPN no tienen flexibilidad en los puertos proporcionados a un usuario para usar su red. Estos puertos son específicos para cada protocolo de red.

Para la instalación de este proveedor en pfSense será necesario conocer que es y cómo funciona el algoritmo de encriptación. Es el nombre del algoritmo de encriptación. AES es un estándar de cifrado utilizado, recomendado y aprobado por la agencia de seguridad nacional de los Estados Unidos (NSA), es utilizado para asegurar la comunicación clasificada como TOP SECRET.

De acuerdo con la documentación oficial de NordVPN, Si alguien utilizara un ataque de fuerza bruta (que implica verificar todas las posibles combinaciones de teclas), necesitaría juntas todos los recursos computacionales que la humanidad dispone y utilizar todo el tiempo que el universo lleva existiendo, y aun así posiblemente no tener éxito.

Configuración de VPN

Una red doméstica se gestiona a través de un router local, mientras que una VPN (red privada virtual) se gestiona de forma virtual. Para poder utilizar una VPN, tanto el cliente como el proveedor deben gestionar un software que permita a las máquinas comunicarse entre sí y garantizar el cifrado de la VPN. En la mayoría de los casos, el proveedor es controlado a través de un servidor de acceso remoto o RAS (remote access server), que permite verificar la información transmitida a través de varios tipos de protocolos y procesos de tunelización. El túnel VPN es una conexión encriptada entre el usuario, el cliente y el servidor. La tunelización garantiza que la información esté encapsulada de manera que no se pueda interceptar, alterar o vigilar. Esto se logra mediante el envío de la dirección IP del servidor anfitrión a través del cual se ejecuta la encriptación VPN en lugar de la dirección IP del usuario, lo que garantiza el anonimato total.

Entre los protocolos utilizados en el proceso de tunelización, se encuentran el Protocolo de Túnel Punto a Punto (PPTP), el protocolo de Túnel de Capa 2 (L2TP), el protocolo de Túnel de Socket Seguro (SSTP) y el protocolo de OpenVPN. Este último es utilizado por pfSense y consta de una aplicación de software de código abierto que utiliza conexiones punto a punto, que a su vez utilizan tanto SSL como TLS para el intercambio de claves. A diferencia del protocolo L2TP, el protocolo de OpenVPN puede ejecutarse a través de puertos UDP o TCP, lo que permite eludir los firewalls.

La configuración de la VPN se realiza a través del software pfSense utilizando la configuración de OpenVPN. Para ello, se ha seleccionado el proveedor NordVPN y se ha elegido el servidor recomendado por parte de NordVPN para obtener los protocolos disponibles para el servidor. En este caso, se ha utilizado el protocolo TCP con puerto 443.

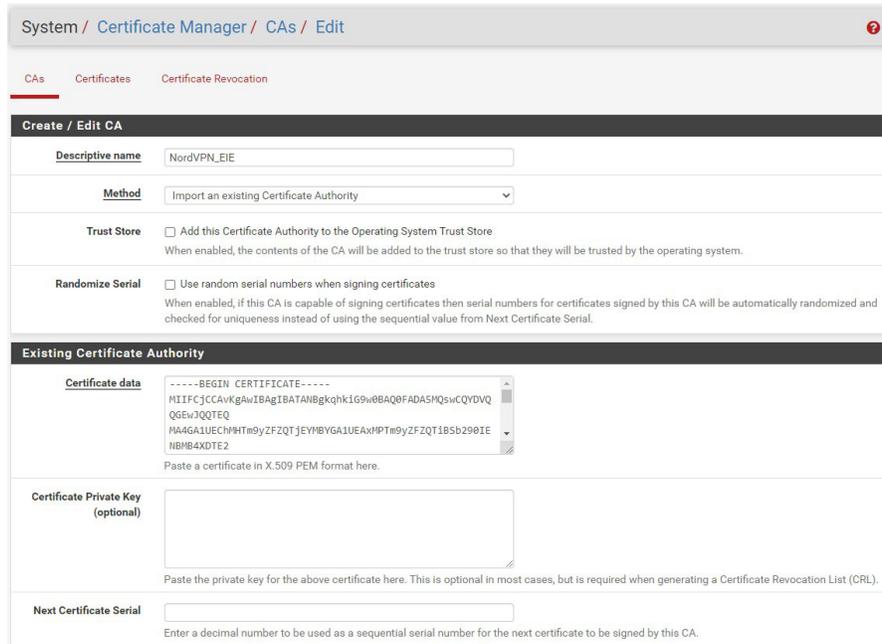
Para configurar la VPN, se debe introducir el certificado del protocolo TCP para el servidor en EUA. Cada servidor posee un certificado diferente y se puede observar cómo hacerlo en la Figura 9 de la configuración del sistema.

Luego se procede a configurar el cliente de la VPN en la sección de OpenVPN. Se selecciona el modo del servidor "Peer to Peer (SSL/TLS)" y se elige el protocolo que se utilizará para la configuración. En este caso, se selecciona el protocolo TCP para direcciones IPV4 y se utiliza el puerto por el cual se tiene la conexión del proveedor de internet (WAN). En esta configuración, es necesario especificar la autenticación del usuario por parte del proveedor de la VPN. Esta información se puede obtener dentro del sitio web del proveedor.

Luego, se procede a configurar los valores del proveedor criptográfico, donde se establecen los algoritmos y paquetes de cifrado, los valores de nombres de identidad, los valores del almacén de claves de cifrado y los valores de la entidad emisora de certificados (CA). Estos

Figura 9

Configuración de certificado de VPN



The screenshot shows the 'Create / Edit CA' form in the PfSense web interface. The breadcrumb trail is 'System / Certificate Manager / CAs / Edit'. The form has three tabs: 'CAs', 'Certificates', and 'Certificate Revocation'. The 'CAs' tab is active. The form fields are as follows:

- Descriptive name:** NordVPN_EIE
- Method:** Import an existing Certificate Authority
- Trust Store:** Add this Certificate Authority to the Operating System Trust Store. When enabled, the contents of the CA will be added to the trust store so that they will be trusted by the operating system.
- Randomize Serial:** Use random serial numbers when signing certificates. When enabled, if this CA is capable of signing certificates then serial numbers for certificates signed by this CA will be automatically randomized and checked for uniqueness instead of using the sequential value from Next Certificate Serial.
- Existing Certificate Authority:**
 - Certificate data:** A text area containing a PEM-formatted certificate:

```
-----BEGIN CERTIFICATE-----
MIIFCjCCAvKqAwIBAgIBATANBgkqhkiG9w0BAQ0FADASMQswCQYDVQ
QGEwJQTEEQ
NA4GA1UEChM9yZFZQTJjEYhBYGA1UEAxM9yZFZQT1BSb291E
NBMB4XDTE2
```

 Below the text area is the instruction: 'Paste a certificate in X.509 PEM format here.'
 - Certificate Private Key (optional):** An empty text area. Below it is the instruction: 'Paste the private key for the above certificate here. This is optional in most cases, but is required when generating a Certificate Revocation List (CRL).'
 - Next Certificate Serial:** An empty text area. Below it is the instruction: 'Enter a decimal number to be used as a sequential serial number for the next certificate to be signed by this CA.'

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

valores se configuran según el protocolo TCP obtenido por parte del proveedor de la VPN.

Dentro de las opciones avanzadas de la configuración del cliente, se encuentra el apartado de creación del puerto virtual. En este apartado, se establece la opción única para direcciones IPV4.

Posteriormente, en el apartado de interfaces, se pueden observar dos interfaces configuradas por defecto (WAN y LAN). Es necesario crear y habilitar la interfaz para la VPN. En este caso, se le ha asignado el nombre del proveedor "NordVPN", como se puede ver en la Figura 10.

Una vez seleccionadas las opciones adecuadas de configuración desde la interfaz web de pfSense, se procede a habilitar la función de "DNS resolver" en la sección de "servicios-DNS resolver". Esta función se encarga de convertir nombres de dominios en direcciones IP. En las configuraciones, se debe seleccionar la opción de interfaces de salida y el certificado SSL/TLS.

En la sección de interfaces de salida, se debe

especificar la interfaz de salida previamente configurada y nombrada como " NordVPN". De esta manera, el servidor DNS utilizará únicamente la interfaz de la VPN para enviar consultas a servidores autorizados y recibir respuestas. Esta opción trae de manera predeterminada el uso de todas las interfaces disponibles, por lo que es importante establecer la interfaz correcta para garantizar el buen funcionamiento de la VPN.

En la sección del certificado SSL/TLS, se debe seleccionar el certificado denominado "Web Configurator default". Si este certificado no está disponible por defecto, se debe realizar una configuración similar a la que se muestra en la Figura 11. Este certificado es necesario para garantizar la seguridad de la conexión VPN mediante el cifrado SSL/TLS.

Uno de los objetivos principales del uso de un proveedor de VPN es garantizar el anonimato al generar tráfico hacia internet. Para lograr esto, es necesario habilitar la opción de identidad oculta dentro de las opciones avanzadas

Figura 10

Configuración general de pfSense

General Configuration

Enable Enable interface

Description NordVPN
Enter a description (name) for the interface here.

IPv4/IPv6 Configuration This interface type does not support manual address configuration on this page.

MTU
If this field is blank, the adapter's default MTU will be used. This is typically 1500 bytes but can vary in some circumstances.

MSS
If a value is entered in this field, then MSS clamping for TCP connections to the value entered above minus 40 for IPv4 (TCP/IPv4 header size) and minus 60 for IPv6 (TCP/IPv6 header size) will be in effect.

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

Figura 11

Opciones generales del servicio DNS resolver

General DNS Resolver Options

Enable Enable DNS resolver

Listen Port 53
The port used for responding to DNS queries. It should normally be left blank unless another service needs to bind to TCP/UDP port 53.

Enable SSL/TLS Service Respond to incoming SSL/TLS queries from local clients
Configures the DNS Resolver to act as a DNS over SSL/TLS server which can answer queries from clients which also support DNS over TLS. Activating this option disables automatic interface response routing behavior, thus it works best with specific interface bindings.

SSL/TLS Certificate webConfigurator default (63c492f78b9a2)
The server certificate to use for SSL/TLS service. The CA chain will be determined automatically.

SSL/TLS Listen Port 853
The port used for responding to SSL/TLS DNS queries. It should normally be left blank unless another service needs to bind to TCP/UDP port 853.

Network Interfaces All, WAN, LAN, NORDVPN
Interface IPs used by the DNS Resolver for responding to queries from clients. If an interface has both IPv4 and IPv6 IPs, both are used. Queries to other interface IPs not selected below are discarded. The default behavior is to respond to queries on every available IPv4 and IPv6 address.

Outgoing Network Interfaces All, WAN, LAN, NORDVPN
Utilize different network interface(s) that the DNS Resolver will use to send queries to authoritative servers and receive their replies. By default all interfaces are used.

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

del servicio DNS resolver. Además, se debe seleccionar la versión adecuada, tal como se muestra en la Figura 12. De esta manera, se podrá garantizar que la identidad del usuario permanezca oculta y protegida durante la navegación en línea.

Una vez finalizada la configuración de la VPN, se deben configurar las reglas necesarias para habilitar la traducción de direcciones de red. Para hacer esto, se debe acceder al apartado de firewall y seleccionar NAT. Luego, se debe

elegir el modo de NAT saliente o “outbound NAT mode” y seleccionar la opción de modo manual de generación de reglas.

En este punto, se deben dejar las reglas en la opción para ser generadas por defecto y agregar una nueva para identificar la red privada. Es importante especificar que la regla será de tipo IPV4 en el apartado “address family” y seleccionar la opción “any” en la sección de protocolo, tal como se muestra en la Figura 13.

Figura 12

Opciones de privacidad avanzadas

| Advanced Privacy Options | |
|---------------------------------------|--|
| Hide Identity | <input checked="" type="checkbox"/> id.server and hostname.bind queries are refused |
| Hide Version | <input checked="" type="checkbox"/> version.server and version.bind queries are refused |
| Query Name Minimization | <input type="checkbox"/> Send minimum amount of QNAME/QTYPE information to upstream servers to enhance privacy Only send minimum required labels of the QNAME and set QTYPE to A when possible. Best effort approach; full QNAME and original QTYPE will be sent when upstream replies with a RCODE other than NOERROR, except when receiving NXDOMAIN from a DNSSEC signed zone. Default is off. Refer to RFC 7816 for in-depth information on Query Name Minimization. |
| Strict Query Name Minimization | <input type="checkbox"/> Do not fall-back to sending full QNAME to potentially broken DNS servers QNAME minimization in strict mode. A significant number of domains will fail to resolve when this option is enabled. Only use if you know what you are doing. This option only has effect when Query Name Minimization is enabled. Default is off. |

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

Figura 13

Edición avanzada de opciones de trafico de salida NAT en PfSense

| Edit Advanced Outbound NAT Entry | | | |
|----------------------------------|--|---|---------------|
| Disabled | <input type="checkbox"/> Disable this rule | | |
| Do not NAT | <input type="checkbox"/> Enabling this option will disable NAT for traffic matching this rule and stop processing Outbound NAT rules In most cases this option is not required. | | |
| Interface | NORDVPN The interface on which traffic is matched as it exits the firewall. In most cases this is "WAN" or another externally-connected interface. | | |
| Address Family | IPv4 Select the Internet Protocol version this rule applies to. | | |
| Protocol | any Choose which protocol this rule should match. In most cases "any" is specified. | | |
| Source | Network | 172.16.0.0 / 24 | Port or Range |
| | Type | Source network for the outbound NAT mapping. | |
| Destination | Any | / 24 | Port or Range |
| | Type | Destination network for the outbound NAT mapping. | |
| | <input type="checkbox"/> Not Invert the sense of the destination match. | | |

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

Como último paso, se deben configurar los servidores en pfSense. En este caso, el proveedor ofrece dos servidores DNS: server 1 (103.86.96.100) y server 2 (103.86.99.100). Esta configuración se puede modificar en el apartado de sistema y desde la sección de ajustes generales.

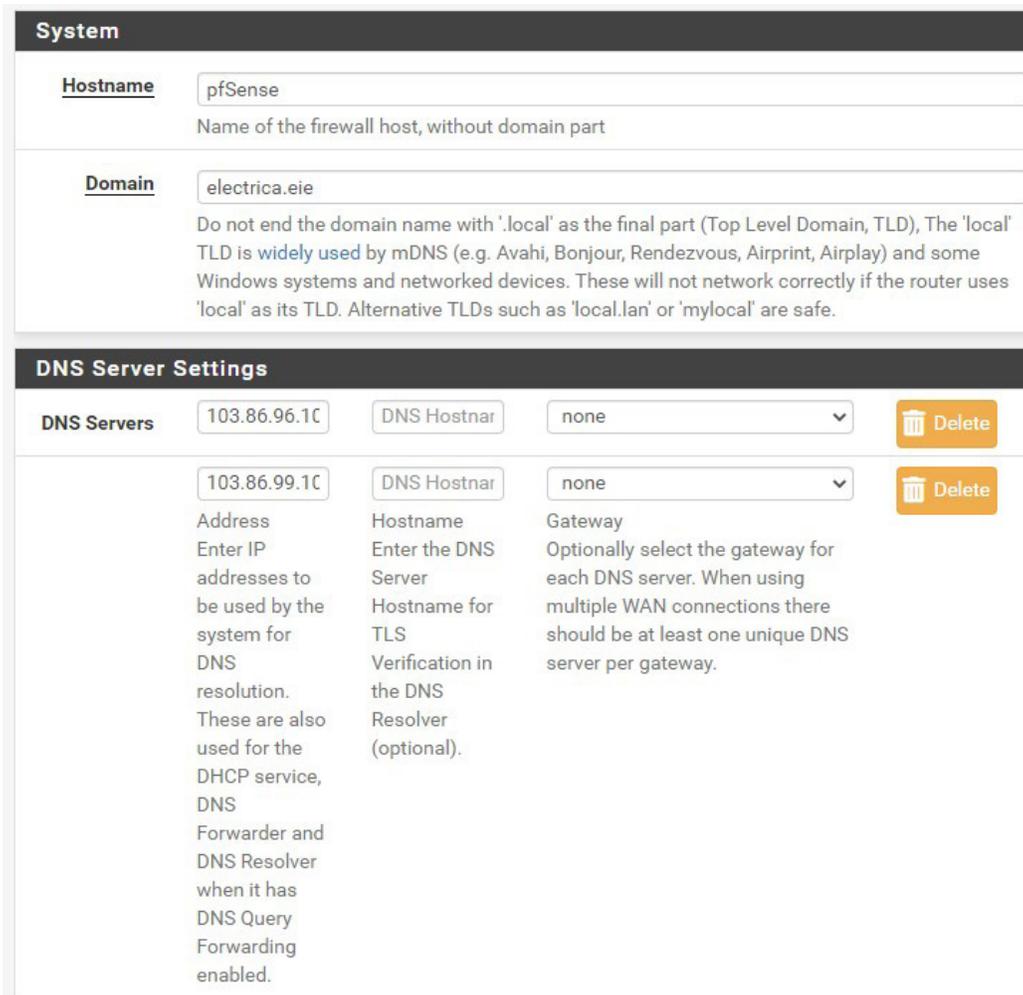
En la Figura 14 se pueden observar los cambios ya realizados. Además, se ha modificado el nombre de dominio por “eléctrica.eie”. Es importante tener en cuenta que este nombre puede variar, pero es esencial respetar que no se debe terminar un dominio en “.local”.

Después de completar esta última operación, se habrá configurado un sistema completo que encripta el tráfico a través de VPN, lo que proporciona protección para la información del usuario. Todo esto se ha llevado a cabo utilizando el software pfSense.

Como se ha mencionado anteriormente, existen diversas herramientas para monitorear el funcionamiento de todos los elementos de la VPN. En el caso del cliente de la VPN, se puede acceder al estado del cliente, el cual proporciona información sobre la dirección local, la dirección virtual y la dirección del host mediante la cual se accede a internet. Como se puede

Figura 14

Configuración de servidores DNS de NordVPN



Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

observar en la Figura 15, el servidor se encuentra activo (up) y ha proporcionado una dirección IP de host remota: 37.120.157.19, utilizando el puerto 443.

Servicios de ciberseguridad por enrutamiento versus aplicaciones VPN

En el mercado existen numerosas opciones de VPN. La razón por la cual se utiliza el enrutamiento es para asegurar la protección de datos en laboratorios de investigación. En los laboratorios privados, la seguridad de los datos es fundamental, pero también se debe considerar la portabilidad de la implementación y la ciberseguridad por enrutamiento en caso

de que se necesite migrar el laboratorio a otra ubicación geográfica. Por esta razón, es posible que esta aplicación no sea viable en situaciones donde se necesite proteger los datos de un gran número de usuarios.

Cuando el cliente está activo y conectado al servidor del proveedor de VPN, y las compuertas están activas y sin reportes de pérdida de información tal como se observa en la Figura 16, se tiene un sistema seguro en el que el tráfico de información viaja de manera encapsulada a través de los túneles encriptados por medio del servidor de VPN. Además, se cuenta con un franqueo del firewall que brinda una red privada segura. En la Figura 17, se puede

Figura 15

Estadísticas del estado del cliente y del proveedor VPN

| Client Instance Statistics | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|-------------------------|---------------|-----------------|-------------------|------------|----------------|---------|
| Name | Status | Connected Since | Local Address | Virtual Address | Remote Host | Bytes Sent | Bytes Received | Service |
| NordVPN TCP4 | up | Fri Jan 20 3:54:47 2023 | [Redacted] | 10.7.3.6 | 37.120.157.19:443 | 46.89 MiB | 606.49 MiB | |

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

Figura 16

Estado de los gateways

| Status / Gateways | | | | | | | |
|--------------------|------------|------------|---------|----------|------|--------|---------------------------------|
| Gateways | | | | | | | |
| Name | Gateway | Monitor | RTT | RTTsd | Loss | Status | Description |
| WAN_DHCP (default) | [Redacted] | [Redacted] | 0.598ms | 1.617ms | 0.0% | Online | Interface WAN_DHCP Gateway |
| NORDVPN_VPNV4 | 10.7.0.1 | 10.7.0.1 | 69.53ms | 27.622ms | 0.0% | Online | Interface NORDVPN_VPNV4 Gateway |

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

Figura 17

Prueba de dirección IP a través de VPN



WhatIsMyIP.com

My Public IPv4 is: [185.197.192.21](#)

My Public IPv6 is: Not Detected

My IP Location is: Miami, FL US

My ISP is: Packethub S.A.

Nota. Imagen ilustrativa capturada en la interfaz web de PfSense.

observar que la dirección IP de salida a internet es: 185.197.192.21, la cual se localiza en Miami, Florida, Estados Unidos. De esta manera, se logra ocultar por completo la identidad de la dirección IP local.

CONCLUSIONES

Al momento de plantearse la instalación de un router con el servicio de VPN integrado, deben tomarse en cuenta las medidas de ciberseguridad tomadas previamente por el host. Si esto no es tomado en cuenta pueden encontrarse puntos de comunicación interrumpida como podría ser un firewall que permita solo acceder mediante puertos específicos que no coincidan con los puertos proporcionados por el proveedor de la VPN. En su mayoría, estos proveedores trabajan de manera tal, que su infraestructura está determinada y no pueden cambiar el puerto que proporcionan, esto también se debe a medidas de ciberseguridad.

Aunque pfSense es un software basado en un sistema operativo de código abierto, este por sí solo tiene acceso a muchas medidas de ciberseguridad para ser implementadas, sin embargo, para acceder a un mejor beneficio de este router es necesario contratar los servicios de un proveedor de una VPN y es muy importante entender que, aunque estas dos tecnologías se unan y sean compatibles, el sistema de versionado y actualización es completamente independiente uno del otro. Por esto se recomienda que, si se decide implementar un sistema con estos dos elementos en mente, se debe estar pendiente de la documentación en cada actualización por parte de ambas comunidades.

REFERENCIAS

Amazon Web Services. (2023). *¿Qué es una VPN? - Explicación de las redes privadas virtuales - AWS*. Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/es/what-is/vpn/>

CISCO. (2022a). *¿Qué es la ciberseguridad?* Cisco. https://www.cisco.com/c/es_mx/products/security/what-is-cybersecurity.html

CISCO. (2022b). *¿Qué es un firewall?* - Cisco. https://www.cisco.com/c/es_mx/products/security/firewalls/what-is-a-firewall.html

IBM. (2021). *¿Qué es un ataque cibernético?* | IBM. <https://www.ibm.com/mx-es/topics/cyber-attack>

Jones, J. P. (2023). *UDP o TCP: ¿en qué se diferencian y cuál deberías usar?* <https://www.top10vpn.com/es/guias/udp-vs-tcp/>

KeepCoding. (2022). *¿Qué es NAT?* | KeepCoding Bootcamps. *KeepCoding Tech School*. <https://keepcoding.io/blog/que-es-nat/>

Latto, N. (2020). *¿Qué es WannaCry?* <https://www.avast.com/es-es/c-wannacry>

Michalec, O., Shreeve, B., & Rashid, A. (2023). Who will keep the lights on? Expertise and inclusion in cyber security visions of future energy systems. *Energy Research & Social Science*, 106, 103327. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103327>

Migliano, S. (2023). *Las 10 mejores VPN del 2023 calificadas por expertos en VPN*. <https://www.top10vpn.com/es/mejor-vpn/>

NordVPN. (2023). *Cifrado VPN de última generación*. <https://nordvpn.com/es/features/next-generation-encryption/>

Zientara, D. (2018). *Mastering pfSense: Manage, secure, and monitor your on-premise and cloud network with pfSense 2.4, 2nd Edition*. Packt Publishing Ltd.

Esta página está dejada intencionalmente en blanco



**UNIVERSIDAD
DE EL SALVADOR**



SIC-UES

Secretaría de Investigaciones Científicas
de la Universidad de El Salvador.

ISSN 2521-8794



9 772521 879403