

IMPACTO DE MODELOS DEL ARCO ELÉCTRICO DE UN
INTERRUPTOR DE POTENCIA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO

JENNIFER CASTAÑO ESTRADA

HECTOR FABIÁN RODRÍGUEZ LOZANO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2015

IMPACTO DE MODELOS DEL ARCO ELÉCTRICO DE UN
INTERRUPTOR DE POTENCIA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO

JENNIFER CASTAÑO ESTRADA 1088283328

HECTOR FABIÁN RODRÍGUEZ LOZANO 1088258724

Proyecto de grado para optar por el título de
Ingeniero Electricista

Director: M.Sc. ALFONSO ALZÁTE GÓMEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2015

IMPACTO DE MODELOS DEL ARCO ELÉCTRICO DE UN
INTERRUPTOR DE POTENCIA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia nos gustaría agradecer a Dios por bendecirnos para llegar hasta donde hemos llegado, porque ha hecho realidad este sueño anhelado y tanto tiempo trabajado.

A la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA por darnos la oportunidad de formarnos paso a paso, esfuerzo tras esfuerzo, tintos, trasnochadas, juergas y muchas canas hasta lograr hoy ser por fin profesionales.

Al M.SC ALFONSO ALZÁTE GÓMEZ por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos y paciente orientación, su experiencia y su motivación ha logrado dejar en nosotros su semilla de profesional íntegro hacia la educación; con él se hace extensiva a toda la planta de docentes al aportar su enorme grano de arena en esta tenaz formación.

Por último, queremos agradecer a todas aquellas personas que sin esperar nada a cambio, han formado parte de nuestra vida profesional brindándonos su amistad, conocimientos, consejos, apoyo, diversión y compañía en los momentos más difíciles de nuestra vida. Algunas están aquí con nosotros y otras en nuestros recuerdos y en el corazón, sin importar en donde estén queremos darles las gracias por formar parte nosotros, por todo lo que nos han brindado y por todas sus bendiciones.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

Jennifer Castaño Estrada

Héctor Fabián Rodríguez Lozano

DEDICATORIA

Quiero dedicar principalmente este logro a DIOS, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis Padres que con todo su cariño y amor hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A mi Abuelo Edgar, por guiarme en la carrera, brindarme su gran apoyo para salir adelante y poder lograr una etapa más en mi vida.

A mi hermana, que siempre me ha acompañado y me ha apoyado durante toda mi carrera.

A mi tía Martha, que ha sido como madre y una incondicional amiga, que me ha brindado su amor, compañía y que con sus consejos ha logrado que mi vida tenga buenos caminos.

A Carlos que ha estado a mi lado con su amor, paciencia y comprensión, confianza y apoyo incondicional para seguir adelante y cumplir otra etapa en mi vida, convirtiéndose en una parte importante en la culminación de éste trabajo y en mi vida.

Jennifer Castaño Estrada

A Dios:

Por darme salud, bienestar y la oportunidad de seguir esta vida.

A mis padres:

José Manuel Rodríguez y Lígía Lozano Ramírez.

Porque todo en mi vida es una consecuencia del amor, cariño y educación que me han dado.

A mis Hermanos:

Iván Darío, Johan Alberto y Anderson Manuel Rodríguez Lozano.

Por su eterno apoyo y confianza.

A mi novia:

María Senayda Melchor Bedoya

Por complementar mi vida durante estos años y ser mi apoyo incondicional.

A toda mi familia:

Por estar siempre conmigo.

Este logro se lo dedico a ustedes por llenar mi vida de momentos

Inolvidables.

Héctor Fabián Rodríguez Lozano

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE GRAFICOS	11
GLOSARIO	13
RESUMEN	15
ABSTRAC	17
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS	21
1.1. GENERAL	21
1.2. ESPECIFICOS	21
2. MARCO CONCEPTUAL	22
2.1. INTERRUPTOR	22
2.2. ARCO ELÉCTRICO	22
2.2.1. Factores y características del arco eléctrico	23
2.2.2. Antecedentes	24
2.2.3. Estándar IEEE	25

3. MARCO TEÓRICO: MODELOS A ANALIZAR	26
3.1. MODELO DE KEMA.....	26
3.2. MODELO DE SHAVEMAKER.....	30
3.3. MODELO DE HABEDANK	31
4. MARCO REFERENCIAL.....	35
5. RESULTADOS.....	40
5.1. MODELO DE HADEBANK	41
5.2. MODELO DE SHAVEMAKER.....	44
5.3. MODELO DE KEMA.....	45
5.4. IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK.....	46
5.5. Adaptación para el modelo de Hadebank	51
6. ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS	59
Cambios de Parámetros Para la Observación	63
7. CONCLUSIONES.....	85
8. RECOMENDACIONES.....	86
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

Lista de Figuras

Figura 1 Medida del Cambio en la Conductancia del Arco Eléctrico Según el Modelo de KEMA	28
Figura 2 Circuito Equivalente en Diagrama de Bloques de Sistemas Eléctricos	40
Figura 3 Circuito del Sistema Eléctrico con Interruptor	46
Figura 4 Modelo de Habedank, en Circuito Simple	47
Figura 5 Modelo de Shavemaker, en Circuito Simple	48
Figura 6 Diagramas de Bloques del Modelo de Hadebank	50
Figura 7 Diagrama de Bloques de Shavemaker.....	51
Figura 8 Adaptación de modelos.....	51
Figura 9 Adaptación de modelos.....	52

Lista de Graficos

Gráfica 1 Voltaje de Arco en cada uno de los cuatro modelos	59
Gráfica 2 Modelos de Arco Eléctrico, Análisis de voltaje	61
Gráfica 3 Modelos de Arco eléctrico, análisis de corriente	61
Gráfica 4 Análisis de cambio de parámetros para cada uno de los modelos	63
Gráfica 5 Cambios de Potencia, Respuesta en el voltaje Modelo de Hadebank	64
Gráfica 6 Modelo de Habedank, corriente contra potencia	65
Gráfica 7 Cambios de voltaje contra potencia, Modelo de habedank.....	66
Gráfica 8 Modelo de Habedank cambios corriente contra potencia	66
Gráfica 9 Modelo de Habedank, Respuesta de voltaje	68
Gráfica 10 Cambios en la Corriente del Arco	68
Gráfica 11 Modelo de Shavemaker, Cambios en Salida de Voltaje	71
Gráfica 12 Modelo de Shavemaker, cambios corriente del arco	72
Gráfica 13 M. Shavemaker cambios tiempo contra voltaje.....	73
Gráfica 14 Corriente del arco en tiempo.....	74
Gráfica 15 Cambios M. Shavemaker, P1 Mayor	75
Gráfica 16 Cambios Shavemaker, P1 menor	75
Gráfica 17 Cambios en la corriente Shavemaker	76
Gráfica 18 Ganancias Shavemaker, Voltaje.....	77
Gráfica 19 Corriente ganancias Shavemaker.....	78
Gráfica 20 Nivelación del voltaje M. Kema	79
Gráfica 21 M. Kema, variación en corriente	79

Gráfica 22 Kema, variaciones de voltaje	80
Gráfica 23 Kema, Variaciones de corriente	81

GLOSARIO

Arco Eléctrico: Descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa enrarecida, normalmente a baja presión, o al aire libre.

Condiciones Inusuales de Operación: En un sistema eléctrico de potencia se presentan cuando este se encuentra fuera de los rangos especificados para su operación óptima, pueden deberse a causas externas como descargas atmosféricas que afectan el sistema o fallas eléctricas en los elementos que lo conforman.

Conductancia: Como la conductancia es lo inverso a la resistencia, se puede decir que esta será la mayor o menor facilidad que da un cuerpo para dar el paso de una corriente eléctrica

Distancia De Tensión Disruptiva: es la menor distancia a la que pueden llegar dos piezas o elementos que faciliten la ionización generando un arco eléctrico.

DigSILENT Power Factory: Es una herramienta integrada de análisis de sistemas eléctricos que combina confiabilidad y flexibilidad en el modelado de elementos, con los algoritmos de solución en conjunto con un concepto único de manejo de base de datos.

Distancia de Seguridad: Distancias mínimas que deben guardarse entre líneas eléctricas y elementos físicos existentes a lo largo de su trazado con el objeto de evitar contactos accidentales.

Falla Eléctrica: Es cualquier corriente eléctrica anormal que genera condiciones anormales en un sistema determinado.

Matlab: Es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación su nombre se basa en las dos

palabras MATrix y LABoratory, es decir un laboratorio de matrices. Su avance ha sido importante en las diferentes aplicaciones de las diferentes empresas, su funcionamiento puede darse para un simple cálculo matemático como para una simulación de redes neuronales. Además del uso en Gráficas de ecuaciones diferenciales y de diferentes tipos de control.

Protección de Sobrecorriente: Es la protección con selectividad relativa que reacciona ante el aumento de la corriente en un elemento protegido.

Relé de Protección: Es un interruptor controlado por un circuito eléctrico o electrónico en el que, por medio de un mecanismo magnético, óptico o digital accionan un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

Resistencia eléctrica: “es la oposición que ofrece un material al paso de los electrones (la corriente eléctrica)”

Simulink: Es un entorno de la herramienta conocida como Matlab, su principal funcionamiento es el uso diagramas de bloques para usar en diferentes aplicaciones, como el diseño basado en modelos matemáticos, los cuales pueden ser en tiempo continuo, discreto, además de su utilidad en diferentes circuitos, ya que posee bloque es de simulación de estos diferentes elementos.

Sistema de Potencia: Es un sistema de suministro eléctrico cuyos niveles de tensión son iguales o superiores a los 13,2 KV, (este valor depende de cada país). Estos sistemas eléctricos se los denomina también de alta tensión o extra alta tensión, o sistemas eléctricos de transmisión o red eléctrica de transporte.

Sistema de Teleprotección: Sistema de comunicación entre protecciones eléctricas que permite desconectar la parte afectada mediante la transmisión de señales en el menor tiempo posible.

RESUMEN

Para la correcta operación y protección de los sistemas eléctricos de potencia se hace necesario el uso de un interruptor de potencia diseñado para operar en condiciones nominales, igualmente soportar grandes corrientes relacionadas con diferentes fallas eléctricas. En el instante en que se realiza la apertura del interruptor se generan unas condiciones severas, de orden transitorio, al momento de operar el interruptor se genera un fenómeno conocido como arco eléctrico. Para realizar el análisis del arco eléctrico en un sistema de potencia se disponen de varios modelos, para el desarrollo de este trabajo se tomó como referencia las propuestas matemáticas de arco eléctrico desarrollados por Habedank (1993), Modelo de Shavemaker (2000), y KEMA (1992). Es importante dejar en claro que los principios de Cassie y Mayr constituyen la base de los demás modelos de arco eléctrico que se han venido desarrollando al través de la historia; en este trabajo se hace una adaptación del modelo de Shavemaker.

Debido al avance en los sistemas informáticos igualmente se han desarrollado las Tecnologías de la Información y la Comunicación -TICs-, se han convertido en herramientas indispensables para el desarrollo del conocimiento, en este caso, en el campo de la ingeniería eléctrica se usa el software educativo MatLab, y su extensión Simulink, utilizadas en este trabajo con el objeto de analizar el comportamiento de una red sometida al efecto del arco eléctrico producido por el funcionamiento del interruptor de potencia, realizando observaciones de corriente y voltaje contra el tiempo, además fluctuaciones de tensión. Para ello se analizan y comparan los modelos desarrollados por Habedank, Shavemaker y KEMA.

Los resultados generados en este informe plantean la importancia de la simulación de los modelos, teniendo en cuenta que cuando la potencia es mayor no afecta el modelo con respecto a los parámetros iniciales, el modelo de Habedank, es el modelo que relaciona ganancias menores a uno pero no cercanas a cero, el modelo de shavemaker mejorado, es el mejor modelo que arroja la simulación. De

acuerdo a las observaciones realizadas, y en comparación, se puede expresar que el modelo recomendado para los sistemas eléctricos de potencia es el modelo de shavemaker mejorado.

Palabras clave: Arco eléctrico, interruptor de potencia, Habedank, Kema, Shavemaker, fluctuación de tensión, MatLab, Simulink.

ABSTRAC

For the correct protection and operation of the electrical power systems its necessary the use of breaker designed to operate at nominal conditions, also support large currents related to different electrical failures. At the moment that is make breaker opening generated transitional severe conditions, when operating the switch a phenomenon known as electric arc is generated.

For do the analysis the electric arc in a power system of various models are provided for the development of this work was taken as reference the proposed mathematical electric arc developed by Habedank (1993) Shavemaker model (2000), and KEMA (1992). It is important to make clear that the principles of Cassie and Mayr form the basis of other electric arc models have been developed to throughout history; in this work a model adaptation Shavemaker is made.

Due to advances in the informatic systems also have been developed the information and communication technologies have become indispensable tools for the development of knowledge, in this case, in the field of electrical engineering educational software MatLab, and extension Simulink, used in this work in order to analyze the behavior of a subject to the effect of the electric arc produced by the operation of the circuit breaker, making observations of current and voltage against time, plus network voltage fluctuations. To do analyzes and compares the models developed by Habedank, Shavemaker and KEMA.

The results generated in this word suggest the importants of simulation models, given that when the power is higher does not affect much the model with respect to the initial parameters model Habedadnk, is the model comparison, for lower earnings one but not too close to zero, shavemaker improved model, is the best model that throws the simulation. According to the observations made, and in comparison, can be expressed as recommended for the power system model is the model shavemaker.

Keywords: Electric arc, power switch, Habedank, Kema, Shavemaker, voltage fluctuation, MatLab, Simulink.

INTRODUCCIÓN

En el mundo contemporáneo el flujo constante de la energía eléctrica es fundamental para su óptimo funcionamiento, es por esto que el correcto funcionamiento de las redes eléctricas es un factor importante para cualquier profesional. En ese sentido se puede plantear que la calidad de la energía es fundamental, definiendo con ésta la ausencia de interrupciones, alteraciones de la tensión, deformaciones por armónicos en la red, variaciones de voltaje, entre otros factores. Para superar estos impases se han desarrollado equipos eléctricos y electrónicos, estrechamente relacionados con el funcionamiento y control de estos procesos sensibles al suministro, control y monitoreo de la potencia. En este orden de ideas los estudios académicos centran su atención en momentos culmen, para brindar un suministro eléctrico de gran calidad.

En el momento de accionar un interruptor de potencia se presenta un fenómeno producido por la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia potencial y ubicados en una atmosfera gaseosa enrarecida, a baja presión o al aire libre. Bajo condiciones normales se pueden presentar diferentes factores de fallas eléctricas, tales como descargas atmosféricas, fallas a tierra, activación del interruptor, entre otros. Conocer los aspectos correspondientes al arco eléctrico, su extinción, principalmente el control de las condiciones generadas por este con el objeto de que no afecten toda la red eléctrica. Para su estudio se han desarrollado varios modelos, probados por distintos autores como Cassie, Mayr, Kema, Habedank, Shavemaker, el modelo integrado entre Cassie y Mayr, o el modelo mejorado de Mayr.

Si el fenómeno del arco eléctrico está presente en gran variedad de los elementos que conforman un sistema eléctrico, principalmente los interruptores de potencia, entonces simular el comportamiento del arco eléctrico en un interruptor mediante un modelo matemático determinado, es de gran importancia para lograr un flujo eléctrico de calidad.

Los modelos de Cassie y Mayr, son algunos de los más conocidos, igualmente se han desarrollado modelos a partir de estos como el modelo combinado de Cassie y Mayr, o el modelo mejorado de Mayr, sin embargo otros autores han desarrollado otros modelos para ser tratados en el desarrollo de este trabajo, a saber: Modelo de Habedank (1993), Modelo de Shavemaker (2000), Modelos KEMA (1992).

Para modelar el sistema y el papel del arco eléctrico se deben tener en cuenta fenómenos simples pero necesarios, como el hecho de modelar el interruptor con una simple resistencia infinita en un estado de apertura, o como resistencia nula para el estado de cierre, o el interruptor como una resistencia variable en el tiempo, llegando a modelos más y menos complejos, hasta el momento en que se pueda hallar el modelo adecuado.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

Evaluar el comportamiento de 3 modelos matemáticos modernos del arco eléctrico en un interruptor de potencia, y comparar sus resultados con modelos matemáticos convencionales en un sistema eléctrico simulado.

1.2. ESPECIFICOS

- ✚ Definir los modelos matemáticos modernos del arco eléctrico, así, Modelo de Habedank (1993), Modelo de Shavemaker (2000), Modelos KEMA (1992)
- ✚ Implementar los modelos en el programa de simulación MATLAB realizando medición de las principales variables eléctricas.
- ✚ Validar los modelos implementados comparando el resultado de las mediciones con otros modelos convencionales e históricamente reconocidos del arco eléctrico.
- ✚ Realizar mediciones de potencia contra voltaje y fluctuaciones en la red durante la operación de apertura y cierre en un sistema de potencia simulado.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. INTERRUPTOR

El interruptor de potencia juega un papel importante en los sistemas de transmisión y distribución eléctrica; este es el encargado de actuar frente a posibles fallas del sistema, tiene la importante tarea de brindar protección tanto para las personas como para los equipos. En este sentido el principal fenómeno eléctrico presentado en los interruptores es el arco eléctrico, producido por la separación brusca de los electrodos en un medio aislante donde circula una corriente muy alta.

Los interruptores de circuito son los principales dispositivos de protección para los sistemas eléctricos de alto voltaje, éstos son probados en los laboratorios de alta potencia, sometidos a diferentes pruebas según las condiciones y las normas internacionales prescritas, esto se logra a lo largo del uso de herramientas de simulación.¹ Los sistemas eléctricos están compuestos por generadores, transformadores, cables subterráneos, líneas aéreas, entre otros elementos que pueden ser simulados.

2.2. ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico se puede entender como una descarga que se mantiene a sí misma en una atmosfera gaseosa como el aire. El origen de dicha descarga se encuentra en la ionización² del gas, produciendo un enlace eléctrico conductor entre los electrodos ubicados a determinada distancia, sometidos a diferente potencia, con diferente relación de fases o la relación entre una de las fases y la tierra. Es importante tener en cuenta que los arcos eléctricos no aparecen

¹ L. Van der Sluis, W.R., Rutguers “Comparison of Test Cirucits For High-Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations With Arc Models” IEEE Transcions on Power Delivery. Vol. 7, No. 4 October 1992

² RIVERA G., José F.; VALLEJO B., Carlos E. “Estudios de Cálculo del Arco Eléctrico en Sistemas Industriales y Propuestas Para Reducir el Riesgo –Desarrollo de Aplicativos computacionales-” U.P.B. Medellín 2013.

únicamente en cortos circuitos, sino que también son fenómenos presentes en acciones de desconexión o interrupción de circuitos eléctricos tales como fusibles, interruptores, cables, empalmes, puntos de fijación, entre otros. Para evitar un riesgo potencial es importante comprender su funcionamiento, y su relación con los elementos mencionados, es necesario tener precauciones especiales.

En los ambientes de alta tensión el solo hecho de no mantener la debida distancia espacial entre las piezas que se encuentran bajo tensión, es un elemento suficiente para el surgimiento de un arco eléctrico. Dicho arco genera un calor excesivo, explosiones, enormes ráfagas de presión, hasta el punto de fundir materiales y herramientas, los cuales se convierten en cadenas, es decir, son expulsados como partículas con consecuencias incluso fatales.

El arco eléctrico se puede entender como el efecto dejado por el intercambio en el interruptor del circuito de alto voltaje. Al separarse los contactos el ánodo realiza una emisión de electrones al cátodo, haciendo que este se caliente, en este sentido la base del arco se convierte en una fuente de emisión termoiónica. La formación del arco eléctrico, necesariamente no produce graves consecuencias, en condiciones normales de operación el arco debe auto-extinguirse.

2.2.1. Factores y características del arco eléctrico

Es importante comprender que hay una serie de factores que influyen en el desarrollo de un arco eléctrico en un sistema, entre ellas la principal, según las orientaciones de este trabajo es la distancia, se puede presentar por el deslizamiento de alguna de las herramientas, igualmente disminuyendo la distancia de tensión disruptiva, o se pueden presentar conexiones sueltas causando sobrecalentamientos o menores formaciones de arco, algunas fallas en el aislamiento, rupturas del cuerpo aislador. De la misma manera los gases pueden llegar a ser conductores, igualmente se puede llegar a producir condensación de vapor de agua o goteo, sobre la superficie de los materiales

aislantes, corrosión, acumulación de residuos, inclusive el polvo, o también puede darse el arco por algunos transitorios de tensión, sobrecarga de tensión.

En términos generales, el arco puede ser concebido en su constitución como una columna de gas conductor o plasma por la conducción generada en una interrupción abrupta del voltaje. La forma puede ser diferente a la de la tradicional concepción que se tiene de la forma de un arco. Es pues el arco semejante a un conductor gaseoso adaptado en altas fracciones de segundo a las fuerzas electrodinámicas que actúan sobre él. Esto permite que el arco se desplace a altísimas velocidades de más de 200 m/s para corrientes de 15 a 20KA. Los efectos del arco pueden ser térmicos, de presión, luminoso y de ionización. En este orden de ideas es importante reducir la posibilidad de aparición de arco principalmente en sistemas eléctricos complejos.

2.2.2. Antecedentes

En el año de 1907 J. Kelman en Estados Unidos de América patenta el primer interruptor de potencia, en este diseño se detectó que la interrupción instantánea de las altas corrientes generaba un error de potencia transitorio. Ya para el año 1956 T. Browne F. Lingal y A. Strom usaron el pesado hexafluoruro de azufre SF₆ como medio de extinción. Pero es J. Slepian quien clarifica la naturaleza del problema estableciendo que el arco eléctrico es la causa de fenómenos físicos complejos en los interruptores.

Los primeros modelos que describen la conductividad del arco eléctrico fueron desarrollados hacia el año 1939 por Cassie, quien estableciera una ecuación para describir el arco eléctrico de forma dinámica.³ Algunos años después A. Cassie logra describir lo ocurrido en el intervalo de tiempo cuando la corriente se va a acercando a cero. Es O. Mayr quien desarrolla un modelo que establece que la

³ L. Van der Sluis, W.R., Rutguers "Comparison of Test Cirucits For High-Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations With Arc Models" IEEE Transcions on Power Delivery. Vol. 7, No. 4 October 1992

variación dinámica de la conductancia de arco está regida por ecuaciones diferenciales de primer orden.⁴

Los trabajos de Cassie y Mayr fueron consecuentemente desarrollados y mejorados, inclusive combinados generando nuevos modelos.

2.2.3. Estándar IEEE

IEEE es la sigla de Instituto de Ingenieros Eléctricos, Electrónicos y afines, dedicada al avance de la tecnología, se esfuerza por promover actividades técnicas en desarrollo de la creatividad e integración, está dedicado al beneficio de la humanidad, patrocina conferencias técnicas, actividades regionales, nacionales e internacionales entre estudiantes y profesionales, pone a disposición programas educativos relacionados.

Este estándar contiene métodos y datos para el cálculo y análisis profundo y solución a posibles fallas en aspectos como el arco eléctrico en sistemas monofásicos y trifásicos, tanto al aire libre como en recintos cerrados. Los métodos de cálculo fueron desarrollados a partir de pruebas realizadas por el equipo de trabajo de IEEE con el objeto de reproducir los modelos de energía incidente.

⁴ Saavedra Rubio, Gustavo A. "Modelado del Interruptor de Potencia" Universidad de los Andes, Mérida 2008. Pp. 3-5

3. MARCO TEÓRICO: MODELOS A ANALIZAR

En este trabajo se analiza y comparan los modelos propuestos por KEMA, Shavemaker y Habedank. Por ello se hace una breve exposición de los tres trabajos desarrollados de manera independiente y se comparan las observaciones para comprender mejor el modelamiento del arco eléctrico.

3.1. MODELO DE KEMA

El modelo de KEMA⁵ fue desarrollado para el año 1992 en el laboratorio de alta potencia KEMA entregando un nuevo modelo del arco eléctrico. L. Van der Sluis, W.R., Rutgers en el KEMA High-Power Laboratory expusieron el trabajo con título “Comparison of Test Circuits For High-Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations With Arc Models”. En el artículo, cuyo trabajo utiliza un modelo físico de modelo de arco eléctrico desarrollado en el Departamento de Investigación de KEMA para comparar el cambio en el comportamiento del interruptor uno directo y dos pruebas sintéticas de circuitos con un software o programa de cómputo. En él se describe un método para la evaluación del arco eléctrico en oscilogramas, utilizando la llamada caja negra, un modelo físico de arco eléctrico y un modelo que consta de parámetros dependientes de fórmulas y diagramas.⁶

El modelo de KEMA se deriva de la constante de tiempo de Mayr, es decir, con la constante de tiempo invariable en el arco. En otras palabras este modelo toma como base el modelo “Black Box” para representar el comportamiento del arco eléctrico, ya que en el modelo clásico la conductividad del arco se calcula a partir del balance de la energía, donde se asume que la conductividad depende de la energía térmica almacenada en la columna del arco. En su lugar se propone que la conductividad del arco se estima como un balance de energía modificando los parámetros libres en el modelo de Mayr.

⁵ L. van der Sluis, W. R. Rutgers; “Comparison of Test Circuits for High-Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations with Arc Models” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 7, No. 4 pp 2037-2045. Octubre de 1992.

⁶ Ídem.

Con los resultados, se constituyó el modelo empírico del arco eléctrico KEMA formado a partir de una sumatoria de tres modelos modificados de Mayr y nuevos parámetros, tres de ellos libres:

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{\prod_1 \tau_1} g_1^{\lambda_1} u_1^2 - \frac{1}{\tau_1} g_1 \quad (1)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = \frac{1}{\prod_2 \tau_2} g_2^{\lambda_2} u_2^2 - \frac{1}{\tau_2} g_2 \quad (2)$$

$$\frac{dg_3}{dt} = \frac{1}{\prod_3 \tau_3} g_3^{\lambda_3} u_3^2 - \frac{1}{\tau_3} g_3 \quad (3)$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} \quad (4)$$

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \quad (5)$$

EXPRESIONES DEL MODELO KEMA

Dónde:

g : conductancia total del arco

g_n : conductancia del n – ésimo arco

u : voltaje del arco

u_n : voltaje del n – ésimo arco

i : corriente del arco

τ_n : constante de tiempo del n – ésimo arco

$\prod i$: pérdidas de potencia

λ_n : constante de control $\lambda = 1$ resulta el modelo de Cassie

$\lambda = 2$ resulta el modelo de Mayr

El modelo de KEMA propone una elección adecuada de tiempo, potencia y corriente en el pico de tensión del arco y en la extinción de la conductancia la

corriente cero, el cual puede ser ajustado a los valores medidos como se muestra en la siguiente figura.

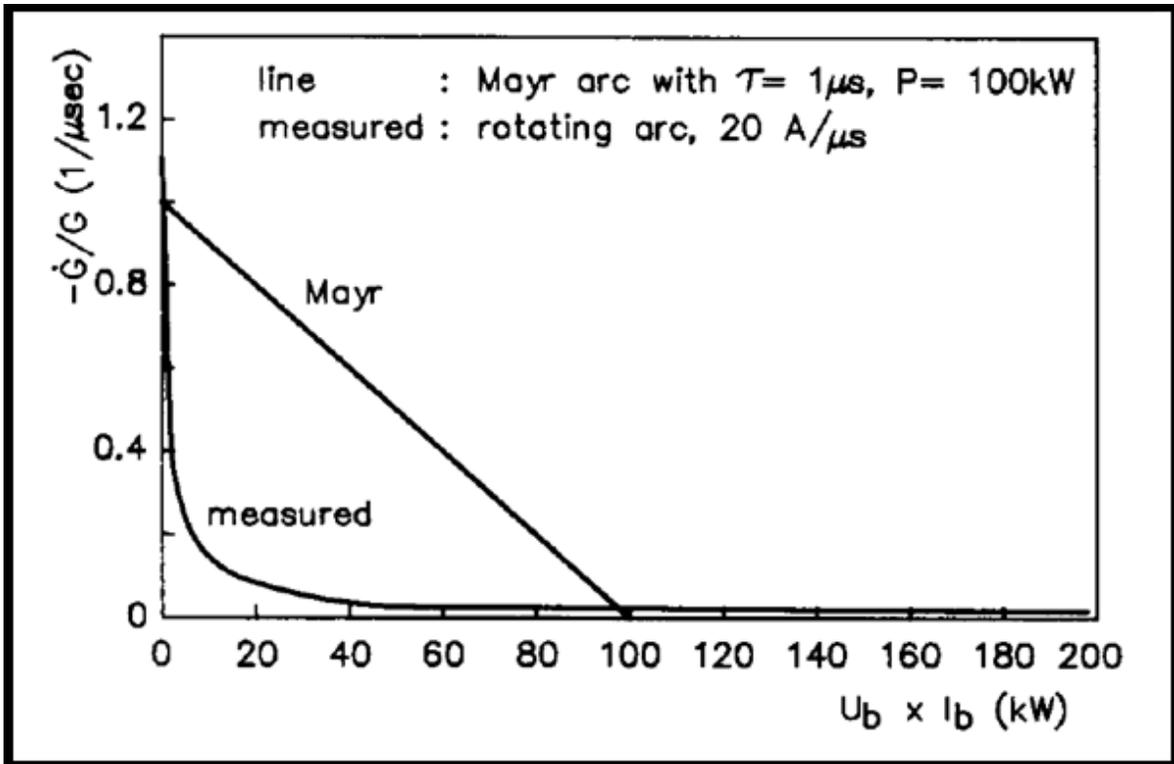


Figura 1 Medida del Cambio en la Conductancia del Arco Eléctrico Según el Modelo de KEMA

Fuente KEMA Labs⁷.

Particularmente este modelo es útil para el cálculo en la interacción en la conmutación eléctrica de diferentes circuitos durante un proceso de interrupción.

“The state variable approach for the calculation of transient voltages and currents in electrical networks containing non-linear elements such as arc models is the

⁷ L. van der Sluis, W. R. Rutgers; “Comparison of Test Circuits for High-Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations with Arc Models” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 7, No. 4 pp 2037-2045. Octubre 1992.

appropriate way to follow. The network equations can be rewritten as simultaneous first-order differential equations.”⁸

El camino adecuado a seguir es el enfoque variable de estado, para el cálculo de las tensiones transitorias y corrientes en sistemas eléctricos que contienen modelos no lineales.⁹

Este trabajo hace una adecuación del modelo de Shavemaker, permite analizar cuando se da la interrupción, ya que hay una relación de un operador, el cual dice que si el tiempo es mayor o igual a la interrupción se hace el análisis de cruce por cero y además se hace un AND lógico para poder empezar a aplicar el valor de P1 en la ecuación, es por esto que se aprecia un switch, que da el paso al valor de p1 luego de darse la interrupción.

“A set of differential equations is called stiff if the time constants of the first-order differential equations are widely different in magnitude or if one of the time constants is quite small in relation to the solution interval.”¹⁰

“Un conjunto de ecuaciones diferenciales es llamado rígido, si las constantes de tiempo de la ecuaciones diferenciales de primer orden son ampliamente diferentes en magnitud o si una de las constantes de tiempo es bastante pequeña en relación con el intervalo de solución.”¹¹

Los resultados arrojados por dicha investigación arrojaron que el modelo de KEMA está muy bien adaptado para la comparación de circuitos de prueba, donde la conductividad en torno a cero es modelada a partir de una modificación de la ecuación de Mayr, igualmente con un modelo de recombinación después de cero.

⁸ L. van der Sluis, W. R. Rutgers; “Comparison of Test Circuits for High-Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations with Arc Models” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 7, No. 4 pp 2037-2045. Octubre 1992.

⁹ Traducción propia.

¹⁰ Idem.

¹¹ Traducción propia.

3.2. MODELO DE SHAVEMAKER

El modelo de Shavemaker se encuentra descrito en el trabajo P. Shavemaker, L. van der Sluis; "Quantification of the interrupting performance of high-voltage circuit breakers" publicado en Noviembre 2002.¹² El cual tuvo como base el modelo desarrollado por Mayr. De allí se tiene que el modelo obtenido es simulado por un programa de computación donde se caracterizan diferentes parámetros, incluso en un trabajo anterior, los mismos autores postulan la representación formal del modelo¹³ donde toman como base el modelo clásico de Mayr adicionando la constante de tiempo, más un factor de enfriamiento. Estos parámetros del arco eléctrico son obtenidos a partir de las mediciones durante el periodo cero de la corriente.

La ecuación general del modelo de Shavemaker se define de la siguiente forma:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{\max(U_{arc}|i|, P_0 + P_i * u * i)} - 1 \right) \quad (6)$$

EXPRESIÓN DEL MODELO SCHAVEMAKER

Dónde:

g : conductancia del arco

u : voltaje del arco

i : corriente del arco

τ : constante de tiempo del arco

P_0 : constante de enfriamiento

P_1 : constante de enfriamiento, se ajusta a cero después del paso de la corriente cero.

¹² P. Shavemaker, L. van der Sluis; "Quantification of the interrupting performance of high-voltage circuit breakers" Science, Measurement and Technology, IEE Proceeding, Vol 149, Issue 4, pp 153-157. Noviembre 2002.

¹³ P. Schavemaker, L. van der Sluis; "An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 15, No. 2 pp 580-584. Abril 2000.

En el trabajo realizado por S.M. Hassan y otros¹⁴ se utiliza el principio de la realimentación negativa utilizada en el control de sistemas dinámicos para mejorar el rendimiento del modelo de Shavemaker. El uso de este principio comprende un “sistema objetivo” el cual se desea obtener con el fin de corregir las desviaciones naturales del modelo; para ello se ajusta la ganancia con la cual se llegará al “sistema objetivo”.

En otro sentido Guardado, Maximov y otros proponen¹⁵ un modelo computacional donde describe el comportamiento dinámico del arco eléctrico. Para ello toma como base el modelo desarrollado por Shavemaker y divide la forma de onda de tensión y corriente en dos partes, cada una establecida como una ecuación diferencial. La unión de sus resultados muestra valores muy congruentes con la respuesta real del interruptor de potencia.

3.3. MODELO DE HABEDANK

Es importante dejar en claro que los principios de Cassie y Mayr constituyen la base de los demás modelos de arco eléctrico que se han venido desarrollando a través de la historia, es decir, los demás modelos se constituyen en combinaciones y mejoras de los planteamientos fundamentales de estos dos autores.

En el año de 1993 Ulrich Habedank en un texto aprobado por la IEEE propone un nuevo modelo de arco eléctrico usando cuatro parámetros constantes.¹⁶ Las pruebas para interruptores de alto voltaje son absolutamente necesarias. Por ello es importante de cada prueba obtener la mayor y mejor información posible. El

¹⁴ S. M. Hassan, E. Youhanna, A. R. Edalatian; “The Modeling of Electric Arc in High Voltage Circuit Breakers with Use of Schavemaker Model and Negative Feedback” International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol 2, Issue. 16, pp 19-22. Mayo 2013.

¹⁵ J. L. Guardado, S. G. Maximov, E. Melgoza, J. L. Naredo, P. Moreno; “An Improved Arc Model Before Current Zero Based on the Combined Mayr and Cassie Arc Models” International Journal of Science, Spirituality, Business and Technology, Vol. 1, No.2. pp. 15-21. Febrero 2013

¹⁶ U. Hadebank. “Aplication of a New Arc Model for the Evaluation of Short-circuit Breaking Test”. Berlin, 1993 IEEE Vol. 8 No. 4 pp.1921-1925

modelo de Habedank se trata de una sumatoria de dos partes que une la ecuación de Cassie con la ecuación de Mayr, así:

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2 g^2}{U_c^2 g_c} - g_c \right) \quad \text{Cassie (7)}$$

$$\frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u^2 g^2}{P_0} - g_m \right) \quad \text{Mayr (8)}$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \quad (9)$$

EXPRESIONES DEL MODELO HABEDANK

Dónde:

g : conductancia total del arco

u : voltaje del arco

i : corriente del arco

τ_c : constante de tiempo de Cassie

U_c : constante de voltaje del arco de Cassie

g_c : Conductancia del arco definida por la ecuación de Cassie

τ_m : constante de tiempo de Mayr

g_m : Conductancia del arco definida por la ecuación de Mayr

P_0 : Constante de pérdida de potencia en estado estacionario.

Como se observa el modelo cuenta con 4 parámetros, dos en la expresión de Cassie las constante de tiempo y voltaje del arco (τ_c y U_c); además cuenta con dos en lo correspondiente a la fórmula de Mayr, la constante de tiempo y la constante de pérdida de potencia en estado estacionario (τ_m y P_0) las cuales dependen del interruptor y del medio.

Para desarrollar las técnicas de simulación digital del modelo de Habedank utilizando las expresiones en su forma incremental, es decir, punto actual y punto siguiente, así:

$$\frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\tau_m} \left[\frac{i_{b1}^2}{P_0} - g_1 \right] \text{ forma incremental Mayr (10)}$$

$$\frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\tau_c} \left[\frac{i_b * u_b}{u_c^2} - g_1 \right] \text{ forma incremental Cassie (11)}$$

Este ajuste en el modelo de Habedank permite realizar algunas técnicas de simulación digital. Este trabajo concluye con la validación del modelo que realiza una comparación de resultados reales con los resultados simulados mediante técnicas digitales.¹⁷

Para caracterizar el comportamiento de un interruptor de media tensión aislado con hexafluoruro de azufre SF6, se utiliza el modelo de Habedank¹⁸, para ello es importante utilizar las expresiones esenciales del modelo dentro de una representación circuital y evaluar el resultado dentro de un pequeño sistema de potencia simulado por computadora, con el fin de evaluar la protección del transformador que presenta la falla.

Igualmente en otro trabajo¹⁹ se realiza una comparación de los resultados producidos por tres software de simulación, MatLab, EMTP-ATP y Pscad/Emtdc; implementando en los programas un modelo de arco de Mayr y Habedank, donde se detallan los ajustes realizados a las expresiones básicas para que fueran comprensibles por los distintos programas. Tales ajustes permite que los

¹⁷ Ibidem.

¹⁸ L. C. Pinto, L. C. Zannetta Jr; "Medium Voltage SF6 Circuit Breaker Arc Model Applications" Electric Power Systems Research 53; pp, 67-71; Enero 2000.

¹⁹ W. Xi-Xiu, L. Zhen-Biao, T. Yun, M. Wenjun, X. Xun; "Investigate on the Simulation of Black-Box Arc Model" 1st International Conference on Electric Power Equipment IEEE pp. 629-636 Junio 2011.

resultados de la simulación varíen levemente entre sí, donde se concluye que la plataforma PSCAD/EMTDC es la más rápida, en detrimento de la exactitud proporcionada por las otras dos.

Una investigación reciente ha realizado la simulación del modelo mejorado de Habedank ²⁰ mezclándola con la teoría electromagnética del principio del arco eléctrico, donde se concluye que el modelo de Habedank proporciona mejores resultados cuando se evalúa en condiciones de alta tensión, donde se es capaz de analizar el cambio de la columna dieléctrica donde fluye el arco eléctrico. En este trabajo se plantea que las aproximaciones matemáticas son algo problemáticas, en relación a las necesidades de conexión para el diseño y construcción de diversas medidas, en ese sentido es importante hacer modificaciones y ajustes a los modelos matemáticos de arco eléctrico. En comparación con los dos modelos principales el modelo de Cassie provee resultados satisfactorios cuando las corrientes son altas o fuertes, mientras que el modelo de Mayr es preferido cuando las corrientes son preferiblemente débiles. Los modelos han gustado, en el sentido en que toma en consideración la constante de la longitud del arco. Sin embargo hay semejanzas en algunos casos donde se toma en consideración la modificación de la longitud del arco.

El modelo de Habedank es más usado para simular los circuitos eléctricos con alto voltaje. Lo cual es la combinación de los modelos de Mayr, de Cassie y de KEMA

²⁰ A. Sawicki; "Modified Habedank and TWV Hybrid Models of a Variable Length Arc for Simulating Processes in Electrical Devices" University of Technology - Czestochowa, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa; No.1 de Enero 2012.

4. MARCO REFERENCIAL

Investigadores de la Universidad de Kraiovia en Rumania²¹ toman el modelo KEMA para realizar una estimación de sus principales parámetros en algunas regiones específicas durante la generación del arco eléctrico. Para ello, toman la expresión analítica del voltaje de arco y asumen un decremento lineal de la corriente. Los valores iniciales son tomados a partir de ensayos de laboratorio donde se mide la pendiente de la corriente y el valor que asume en la región de voltaje cero. El método desarrollado a partir del modelo produce muy buenos resultados acorde con los experimentos reales.

En el trabajo para tesis de maestría²², se realiza la implementación, análisis y resultados del modelo KEMA en el ambiente de trabajo computacional ATPDraw y se comparan sus resultados con el modelo clásico de Cassie y Mayr. Se realizan 500 puntos mediante la variación de los principales parámetros con el ánimo de establecer diferencias y puntos de comparación.

En el 2008 V. Rashtchi y otros²³, hacen uso de los algoritmos genéticos para mejorar la precisión en la estimación de los 9 parámetros del modelo KEMA a través de un experimento sencillo. Tres de los parámetros del modelo dependen de las condiciones del interruptor de potencia, a través de un método sistemático presentado en este paper se puede identificar estos parámetros con muy buena precisión realizando ensayos simples sobre el interruptor analizado.

²¹ G. A. Cividjian, N. G. Silvis, J. Klejch; "KEMA Arc Model Parameters Evaluation" Optimization of Electrical and Electronic Equipments, pp 215-220. Junio 2004.

²² N. Gustavsson; "Evaluation and Simulation of Black-Box Arc Models for High Voltage Circuit-Breakers" Automatization and Communication Systems Engineer Thesis / Supervised ABB Group; Marzo 2004.

²³ V. Rashtchi, A. Lotfi, A. Mousavi; "Identification of KEMA Arc Model Parameters in High Voltage Circuit Breaker by Using of Genetic Algorithm" IEEE International Conference on Power and Energy PEC'08, pp 1515-1517. Diciembre 2008.

Un avance más reciente²⁴ del modelo KEMA realiza una combinación con el modelo físico del arco que involucra conceptos de electromagnetismo y materiales dieléctricos. El modelo finalizado es analizado mediante la herramienta MATLAB donde se evalúa el comportamiento de la tensión y la corriente en una región muy específica al momento de generarse un arco eléctrico: 500 ns antes de la región de corriente cero. La evaluación de los resultados considera una aproximación aceptable para la estimación de estos parámetros tan minuciosos.

En reciente investigación en el Centro Especializado en Automatización y Operación de Sistemas de Potencia de la Universidad de Teherán²⁵, se utilizó el principio matemático del “algoritmo genético” para obtener una representación simulada más completa de los principales modelos del arco eléctrico reconocidos por la comunidad científica internacional.

En el año 2010, durante la Conferencia de Electrotecnia del Mediterráneo²⁶, se realizó exposición del uso del concepto de “redes neuronales artificiales” ampliamente utilizado en otras ramas de la ciencia y la ingeniería para realizar un modelo moderno del arco producido en los interruptores de alta tensión.

Durante la Conferencia 29 del IEEE en Noviembre de 2003²⁷, se presentó una investigación donde se analiza el comportamiento de la corriente límite en el interruptor de potencia en baja tensión, a través de un modelo donde se combina el principio de análisis de campo magnético utilizando método de elementos finitos

²⁴ A. Ahmethodzic, M. Kapetanovic, K. Sokolija; “Linking a Physical Arc Model with a Black Box Arc Model and Verification” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 18, No. 4, pp 1029-1037. Agosto 2011.

²⁵ A. Ballester, L. Ghezzi, M. Popov, G. Tribulato. “Black Box Modeling of Low Voltage Circuit Breakers” IEEE Transactions on Power Delivery, Octubre 2010.

²⁶ A. Parizad, H.R. Baghaee, A. Tavakoli, S. Jamali; “Optimization of Arc Models Parameters Using Genetic Algorithm” EPECS'09, Electric Power and Energy Conversion Systems, pp 1-7. Noviembre 2009.

²⁷ Z. Abderahmane, H. Moulai; “Application of Artificial Neural Networks for Electric Arc Extinction Modeling in High Voltage Circuit Breakers” MELECON 2010, 15TH Mediterranean Electrotechnical Conference; pp. 248-252. Abril 2010.

en conjunto con la teoría básica del análisis de circuitos para determinar la tensión del arco eléctrico y la descripción de la corriente²⁸.

En el año 2000, Walter F. Giménez como resultado de su tesis doctoral en Ingeniería Eléctrica²⁹, realizó la simulación de un modelo interpolado utilizando los principios de Cassie y Mayr pero agregando la representación de “parámetros móviles” mediante el cual desarrolla un modelo más preciso y exacto.

El proyecto de grado de la Universidad de Pereira³⁰ realizó el modelamiento, simulación y análisis del arco eléctrico y su representación en un sistema eléctrico de potencia, objetándose como un trabajo previo al desarrollo de este proyecto de grado, el cual tiene como principal objetivo estudiar cinco modelos del arco moderno y establecer una comparación entre la representación clásica y la moderna.

Una monografía de grado de la Universidad de los Andes en Mérida³¹ realiza la presentación de varios modelos matemáticos del arco eléctrico definidos mediante la caracterización de sus principales parámetros y ecuaciones elementales. Establece una comparación para la representación del arco eléctrico en el interruptor de baja y alta tensión y los modelos matemáticos más representativos del interruptor de potencia. Otra monografía³², se hace con el ánimo de realizar la descripción teórica y el análisis de las fallas de arco con el propósito de determinar su efecto en líneas de transmisión.

²⁸ O. Toshiyuki, I. Masaru, W. Masayoshi, “Current Limiting Simulation for Low Voltage Circuit Breaker” The 29th Annual Conference of the IEEE. Volume: 1, pp. 631-636. Noviembre 2003.

²⁹ W. F. Giménez, “Modelización de interruptores eléctricos de potencia”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya Universidad Nacional del Litoral Santa Fe, Argentina, Junio 2000.

³⁰ Saavedra Rubio G, Dávila Marisol. “Modelado del interruptor de potencia” Monografía para trabajo de grado Universidad de los Andes de Mérida. Noviembre 2008.

³¹ C. D. Ñustez, D. F. Montoya. “Modelado del Arco Eléctrico de un Interruptor de Potencia y su Impacto en un Sistema Eléctrico”. Monografía para trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingenierías. Año 2013.

³² D. Cubillos, L. Ibañez; “Descripción Teórica y Análisis de Fallas de Arco Mediante un Modelo Adecuado, con el Propósito de Determinar su Efecto en Líneas de Transmisión”. Monografía para trabajo de grado. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Año 2008.

En la simulación del arco de Walter Giménez³³, muestran la representación, las herramientas disponibles para el estudio, metodología para su modelación y finalmente la simulación de los interruptores de potencia.

Pinto y Zaneta en su publicación³⁴ utilizan el modelo de Habedank para caracterizar el comportamiento bajo falla de un interruptor de media tensión aislado en gas SF6, para ello utilizan las expresiones esenciales del modelo dentro de una representación circuital del interruptor SF6 y evalúan el resultado dentro de un pequeño sistema de potencia simulado por computadora con el fin de evaluar la protección de un transformador que presenta falla.

Xi Xuo y otros³⁵ realizan una comparación de los resultados producidos por tres software de simulación como lo es MATLAB, EMTP-ATP y PSCAD/EMTDC. Para ello implementa dentro de los programas un modelo de arco de Mayer y el modelo de Habedank detallando los ajustes que se realizaron a las expresiones básicas para que fueran entendidos por cada programa. Estos pequeños ajustes hacen que los resultados en cada plataforma de simulación varíen levemente entre sí, concluyendo que la plataforma PSCAD/EMTDC es la más rápida, pero su exactitud es muy pobre frente a las otras dos.

En una investigación reciente del 2012 Sawicki³⁶ realizó la simulación del modelo mejorado de Habedank, donde se mezcla con la teoría electromagnética del principio del arco eléctrico, allí concluyen que el modelo de Habedank presenta

³³ Walter F, Giménez. "La simulación del arco eléctrico". Ediciones UNL Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
http://books.google.com.co/books?id=zDsgc_glzyMC&pg=PA17&hl=es&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false

³⁴ L. C. Pinto, L. C. Zannetta Jr; "Medium Voltage SF6 Circuit Breaker Arc Model Applications" Electric Power Systems Research 53; pp, 67-71; Enero 2000.

³⁵ W. Xi-Xiu, L. Zhen-Biao, T. Yun, M. Wenjun, X. Xun; "Investigate on the Simulation of Black-Box Arc Model" 1st International Conference on Electric Power Equipment IEEE pp. 629-636 Junio 2011.

³⁶ A. Sawicki; "Modified Habedank and TWV Hybrid Models of a Variable Length Arc for Simulating Processes in Electrical Devices" University of Technology - Czestochowa, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa; Enero 2012.

los mejores resultados cuando se evalúa en condiciones de alta tensión y es capaz de analizar el cambio en la columna dieléctrica donde fluye el arco eléctrico.

5. RESULTADOS

Es importante tener en cuenta, que el análisis de los resultados corresponden a los cuatro modelos, Hadebank, Kema, Shavemaker y Shavemaker mejorado: Primero se generó la interrupcion en cada uno de los modelos, luego se midió el voltaje del arco, tambien se pudo medir la corriente, la cual es el resultado de la simulacion de los modelos en un circuito electrico. El circuito equivalente corresponde al de un interruptor clásico es la forma mas sencilla para identificar las características y resultados del interruptor de potencia, en la siguiente imagen se puede apreciar el circuito equivalente del interruptor de potencia en diagrama de bloques.

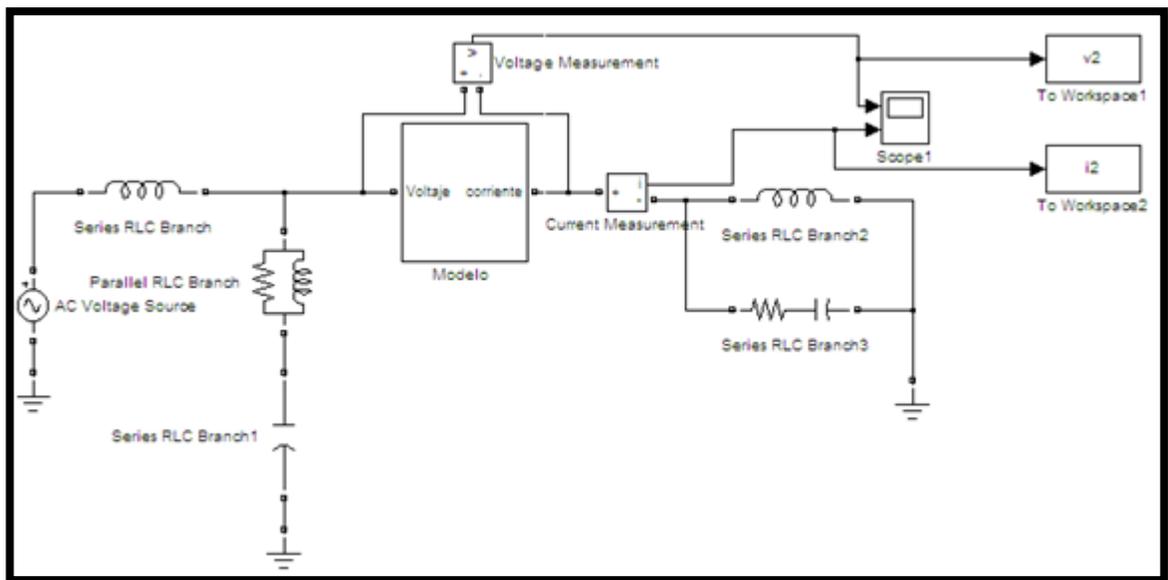


Figura 2 Circuito Equivalente en Diagrama de Bloques de Sistemas Eléctricos

En la figura 2 se pueden apreciar la representación del circuito equivalente de sistema eléctrico en diagrama de bloques, elementos pasivos, elementos generadores de señal, medidores de corriente y de voltaje, los cuales son necesarios en el momento de la toma de datos y gráficas, para su correspondiente análisis, el voltaje Ac es la entrada del modelo, independientemente del que se esté trabajando en el momento, luego de la implementación y del funcionamiento

de cada uno de los modelos, se puede obtener el valor de la corriente de salida, también se puede representar gráficamente dicha corriente.

La conversión del voltaje en la entrada y de la corriente en el punto de salida, para cada uno de los modelos, se da porque estos modelos tienen unas variables dependientes llamadas conductancias, al ser combinadas matemáticamente con los valores de voltajes, pueden generar el valor de la corriente.

Los elementos que conforman el modelo circuital del interruptor de potencia tiene como parámetros los siguientes valores;

$$RC: R = 450 \Omega; C = 1.93 nF$$

$$RL: R = 29.8 \Omega; L = 5.28mH$$

$$L1 = 3.52mH; L2 = 0.6256mH; C = 1.98\mu F$$

$$V_{sin} = Phase = 90^\circ$$

Para la interpretación de los resultados, se puede iniciar con el análisis de los modelos circuitales, para esto se replicó en el programa Simulink el circuito anteriormente descrito, en este caso, el modelo del arco eléctrico se reemplaza por cada uno de los tres modelos, donde se incluye el modelo de Shavemaker mejorado, es decir, con una realimentación negativa, la cual hace variar la respuesta por medio de una ganancia, como se muestra más adelante.

5.1. MODELO DE HADEBANK

El presente modelo se basa en una conexión en serie del modelo de arco eléctrico de Cassie y el modelo de Mayr, las siguiente tres ecuaciones son las usadas para realizar el montaje en simulink.

Ecuación. Modelo de Cassie

$$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2 g^2}{u_c^2 g_c} - g_c \right) \quad (12)$$

Ecuación. Modelo de Mayr

$$\frac{dg_M}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \left(\frac{u^2 g^2}{P_o} - g_M \right) \quad (13)$$

Ecuación. Serie entre la conductancia de Mayr y Cassie

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_M} \quad (14)$$

Si se observan las anteriores tres ecuaciones para el modelo de Hadebank, se puede apreciar diferentes variables que corresponden a constantes, que se pueden obtener de diferentes trabajos realizados. Es importante destacar que estas constantes a la hora de la simulación se le asignan diferentes valores para ser usados en las simulaciones, pero esto ya será explicado y nombrado en secciones posteriores, específicamente en la parte de simulink.

Retomando las tres ecuaciones del modelo, se puede destacar, que relacionan la conductancia total con cada una de las ecuaciones del modelo de Cassie y el modelo de Mayr, es más fácil relacionar la entrada y salida de las ecuaciones diferenciales, y se puede encontrar directamente el voltaje, interpretado por la letra u , y la corriente que corresponde a la salida, se puede tomar de la relación o la multiplicación entre el voltaje y la conductancia total. Lo anterior puede ser explicado de la siguiente manera:

Aplicando la ley de Ohm se puede deducir la siguiente ecuación

Ley de Ohm

$$V = IR \quad (15)$$

Donde el voltaje es igual a la multiplicación de la corriente por la resistencia, es importante destacar que para las ecuaciones de los diferentes modelos no se encuentra ninguna resistencia, pero si se puede apreciar diferentes conductancias, que se pueden determinar mediante la siguiente relación

Ecuación 13. Relación entre la resistencia y conductancia

$$R = \frac{1}{G} \quad (16)$$

Reemplazando (13) en (12), se puede tener la relación entre el voltaje, conductancia y corriente

Ecuación. Relación entre voltaje, conductancia y corriente

$$V = \frac{I}{G} \quad (17)$$

Si se relaciona esta ecuación con la nomenclatura usada en el presente trabajo, se puede dar una mayor idea de lo que se desea

Ecuación

$$u = \frac{i}{g} \rightarrow i = ug \quad (18)$$

En la ecuación (19) se puede determinar cuál será la salida del modelo, ya que lo que se busca es la corriente y esta corresponde al voltaje por la conductancia, y observando las ecuaciones (7) y (8), la salida será la raíz cuadrada del numerador de la primera parte del paréntesis, esto será explicado con mayor detalle, en la sección de la simulación.

5.2. MODELO DE SHAVEMAKER

El modelo de Shavemaker, se basa en el modelo de Mayr mejorado, el cual está descrito por la siguiente ecuación, la cual será usada en el análisis del modelo en Simulink.

Ecuación. Modelo de Shavemaker

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_i}{\max(u_{arc}|i|, P_o + P_1 u_i)} - 1 \right) \quad (19)$$

Como la corriente es la salida del modelo, es necesario reemplazar la ecuación 15 en la ecuación 19, lo cual provoca que la ecuación 19 cambie y quede de la siguiente manera, esta última se implementara en Simulink para sus diferentes análisis.

Ecuación. Modelo de Shavemaker usado para el análisis en Simulink

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2 g}{\max(u_{arc}|u g|, P_o + P_1 u^2 g)} - 1 \right) \quad (20)$$

Además de la implementación de este modelo, existen diferentes trabajos en especial el de Hassan³⁷ el cual lo que hace es una realimentación negativa para el mejoramiento en el tiempo de cruce por cero del voltaje y corriente del arco. Esta realimentación se da con la salida, la cual corresponde a la corriente, donde es multiplicada por una ganancia y esta se resta con la entrada, que corresponde al voltaje. Lo cual se logra con dicha realimentación negativa, ya que una realimentación positiva no haría esta mejora, simplemente generaría un aumento en la señal, en el voltaje y la corriente del arco. En las gráficas generadas en

³⁷ S. M. Hassan, E. Youhanna, A. R. Edalatian; "The Modeling of Electric Arc in High Voltage Circuit Breakers with Use of Schavemaker Model and Negative Feedback" International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol 2, Issue. 16, pp 19-22. Mayo 2013.

Simulink se puede observar todos los bloques usados y la comparación entre el modelo simple y con realimentación negativa.

5.3. MODELO DE KEMA

Este modelo surge

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{\prod_1 \tau_1} g_1^{\lambda_1} u_1^2 - \frac{1}{\tau_1} g_1 \quad (1)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = \frac{1}{\prod_2 \tau_2} g_2^{\lambda_2} u_2^2 - \frac{1}{\tau_2} g_2 \quad (2)$$

$$\frac{dg_3}{dt} = \frac{1}{\prod_3 \tau_3} g_3^{\lambda_3} u_3^2 - \frac{1}{\tau_3} g_3 \quad (3)$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} \quad (4)$$

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \quad (5)$$

Para el modelo de Kema es importante tener en cuenta algunas restricciones o recomendaciones encontradas en la guía de bloques de modelos de arcos, los cuales presentan que la inductancia debe estar limitada a un valor no mayor de 1 e-10, para no presentar problemas de simulación, ya que con valores mayores se pueden presentar inconvenientes en el tiempo de la simulación.

Teniendo en cuenta que se realizan diagramas de bloques para montar estas ecuaciones y que la inversa de la conductancia es la suma de la inversa de cada una de las conductancias, por lo tanto en el momento en que se presente en la ecuación la conductancia, esta debe ser limitada a un valor no mayor del expuesto anteriormente, para evitar de esta, manera problemas en el tiempo de la simulación y poder generar salidas de acuerdo a la implementación del modelo.

5.4. IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK

Antes de cualquier análisis o de implementar los modelos, es necesario tener en cuenta los parámetros, los valores de las constantes y el circuito de interrupción que se desea usar para la implementación de los modelos de arco eléctrico usados para el presente trabajo.

Primero que todo, el circuito usado inicialmente es el que se encuentra en las diferentes referencias y en los textos encontrados en la red, en especial de Bradley³⁸, el cual destaca todos los modelos y los implementa en el circuito que a continuación se presenta:

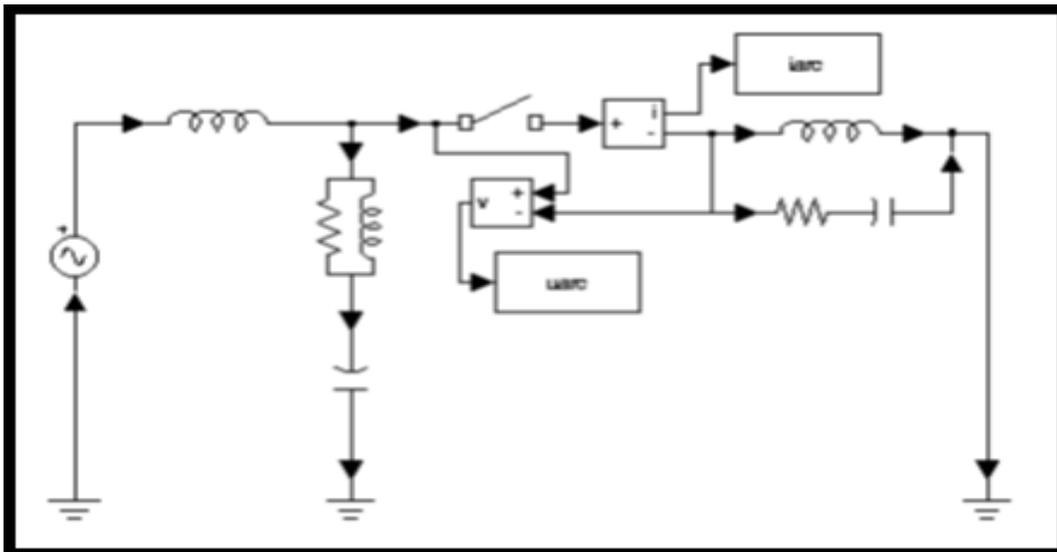


Figura 3 Circuito del Sistema Eléctrico con Interruptor

Los valores de los componentes son los siguientes:

RC:R=450Ohms· C=1.93 nF

³⁸ Allen-Bradley; "Basics of Circuit Breakers". Año 2000.

RL:R=29.80Ohms ,L=5.28mH

L1=3.52mH, L2=0.6256mH, C=1.98μF

El montaje realizado en Simulink se puede apreciar en las siguiente tres figuras, las cuales cada una se componen del circuito y un subsistema; este subsistema contiene el modelo implementado en diagramas de bloques, el cual es más eficiente que el montaje en el editor de ecuaciones diferenciales, esto puede provocar cambios en las ecuaciones por falta de algún paréntesis, además el diagrama en bloques permite la visualización directa de las ecuaciones usadas, de los parámetros, entradas y salidas determinadas, usadas en el modelo, es por todo esto que se decide realizar el montaje en diagrama de bloques, para una mejor visualización y funcionamiento.

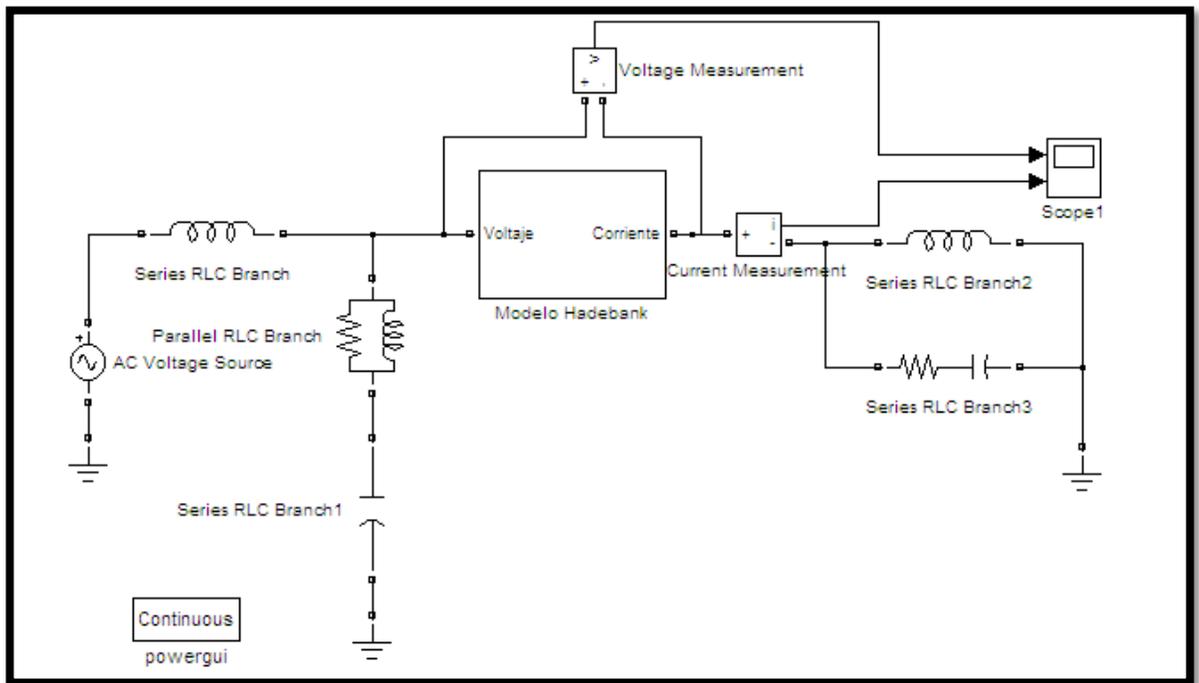


Figura 4 Modelo de Habedank, en Circuito Simple

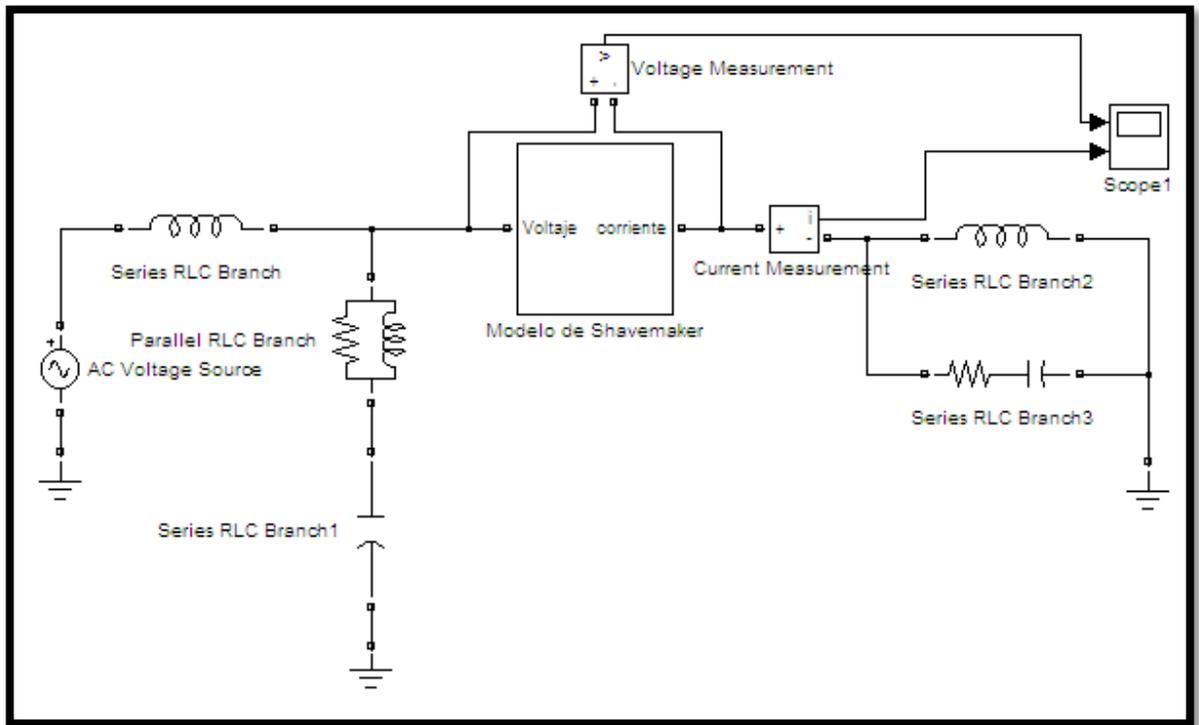


Figura 5 Modelo de Shavemaker, en Circuito Simple

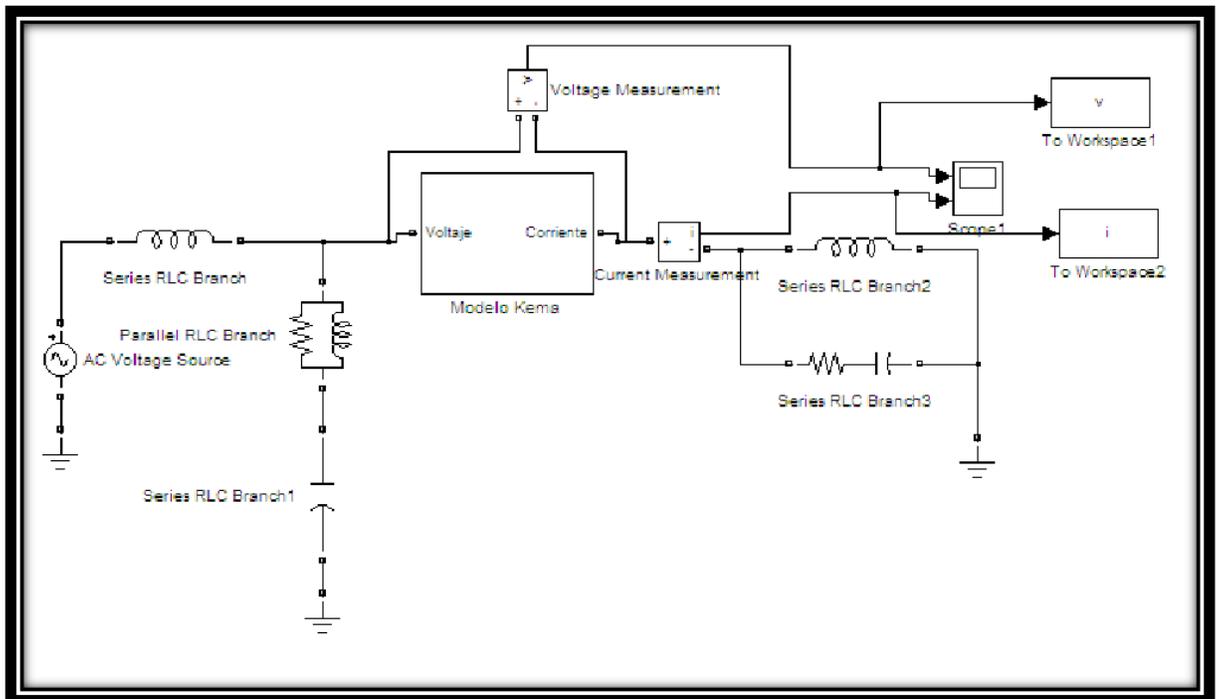


Figura 6 Modelo de KEMA en Circuito Simple

En el algoritmo 1 se plantean los parámetros constantes usados en los diagramas de bloques, las ecuaciones.

Algoritmo 1. Parámetros de los modelos en Matlab

```
Clc

clear all

%% Parámetros para el modelo Hadebank
tao_c=1.2e-6;
tao_m=0.3e-6;
Uc=3850;
Po=30900;

%% Parámetros para el modelo Kema
Lambda1=1.47375;
Lambda2=1.9;
Lambda3=2;
k1=4.9;
k2=5;
k3=100;
tao1=2.87694e-6;
tao2=tao1/k1;
tao3=tao2/k2;
A1=0.42369938e-6;
A2=17-095e-6;
A3=A2*k3;

%% Parámetros del modelo de Shavemaker
Taos =0.2e-6;
Po=15000;
P1=0.995;
Uarc=0;
int =0.02;
Ganancia=1;
```

Ya con los parámetros establecidos, es decir, con los valores de las constantes y el tiempo de la interrupción que para este trabajo es de 0.02 segundos, se puede hacer el análisis de cada uno de los subsistemas o la implementación de los modelos en diagramas de bloques.

De acuerdo a las ecuaciones 7,8 y 9, se tiene lo siguiente para el modelo de Hadebank

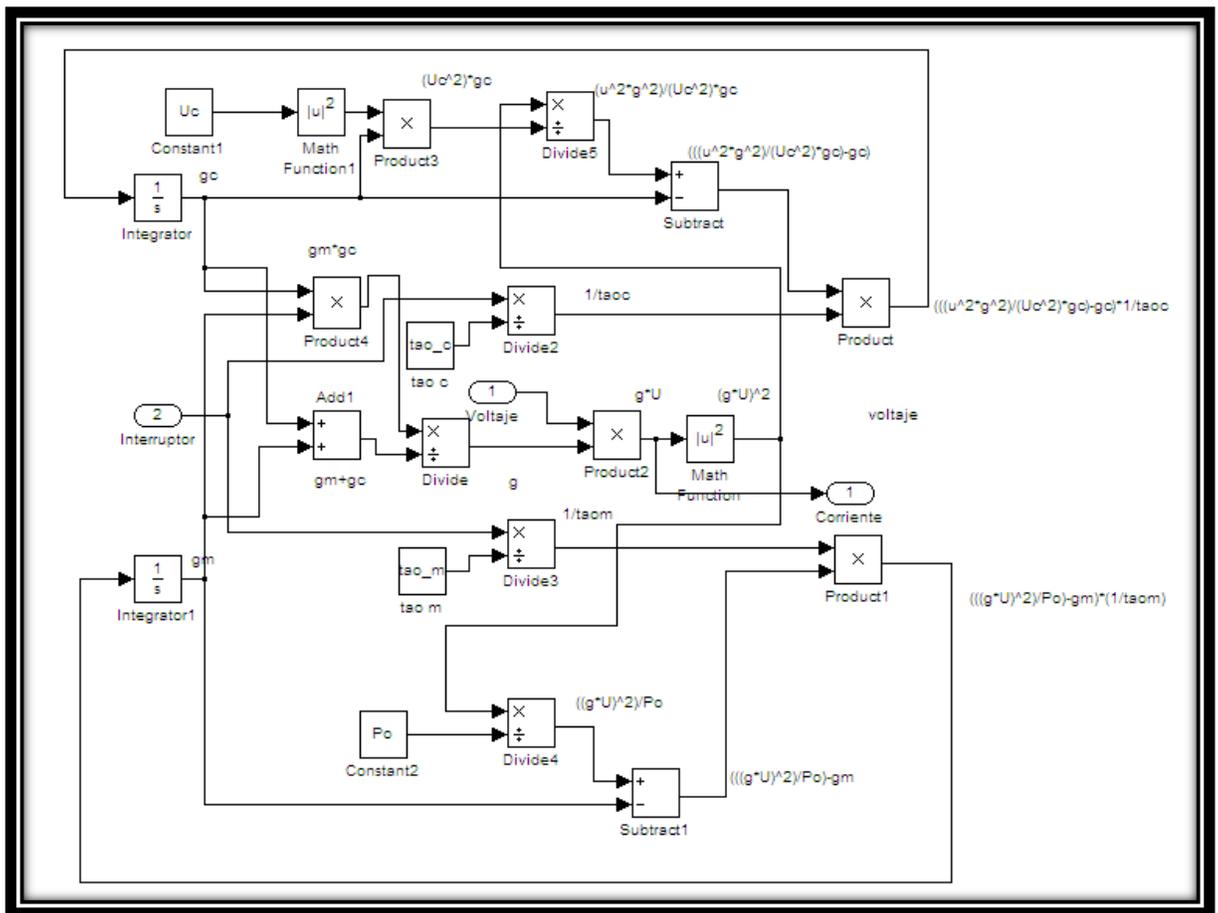


Figura 6 Diagramas de Bloques del Modelo de Hadebank

En esta imagen se puede apreciar la adaptación que se realizó para conocer la medición del voltaje de entrada y salida, esta medición es la entrada del modelo, la cual corresponde al voltaje en las ecuaciones del modelo de Hadebank, además se tiene un bloque llamado Hit Crossing, el cual detecta la variable de la corriente cuando la señal hace una transición a cero, cruza por cero o hace una transición por cero, el Hit Crossing es importante para determinar el cruce por cero.

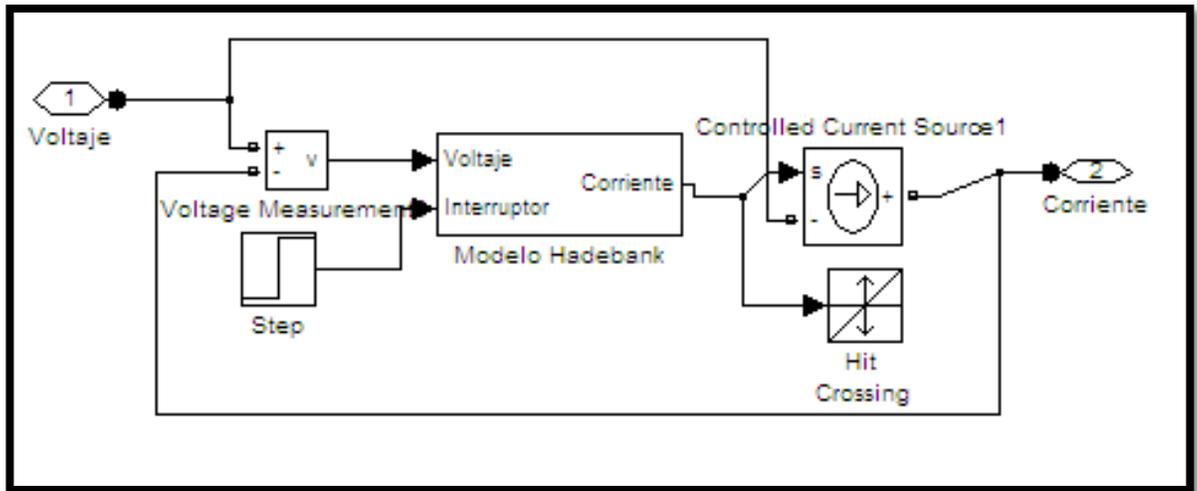


Figura 9 Adaptación de modelos

Por su parte el modelo de Shavemaker, por tener en su ecuación parámetros diferentes y el análisis de un máximo entre dos ecuaciones, debido a esto se realiza una adaptación de más al circuito.

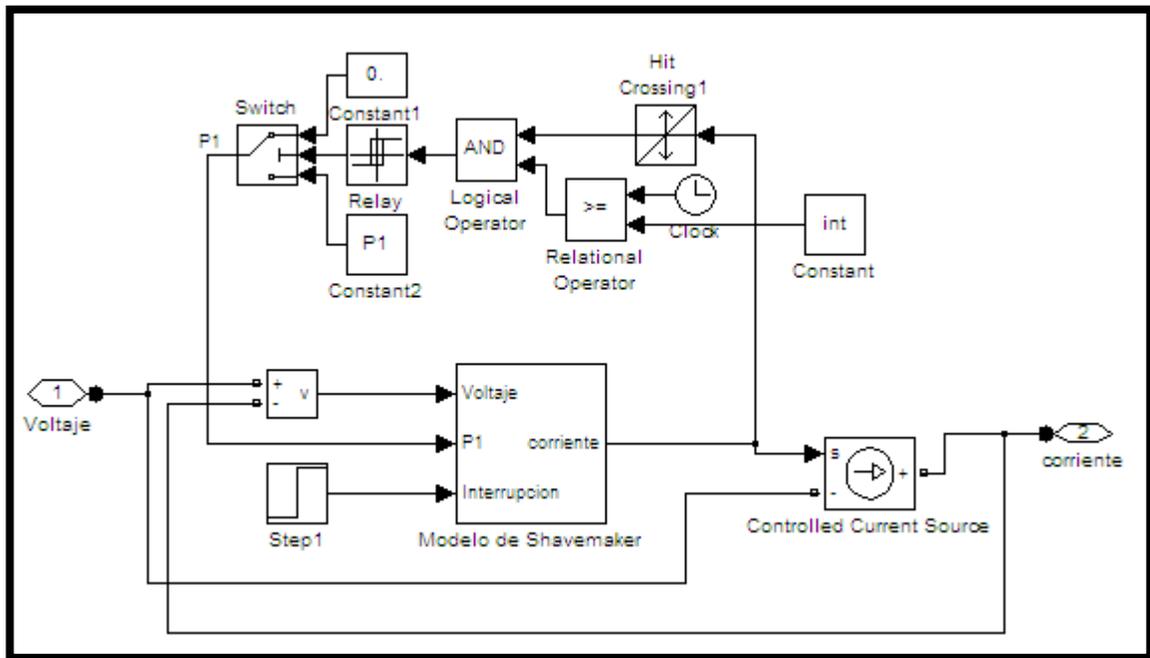


Figura 9 Adaptación del Modelo de Shavemaker

En la figura 9 se puede apreciar la adaptación de la ecuación para el cruce por cero, esto solo se analizará cuando se presenta la interrupción, debido a que hay una relación de un operador, el cual tiene unos parámetros de ajuste en el tiempo, si el tiempo es mayor o igual a la interrupción se hace el análisis de cruce por cero y además se hace un AND lógico para poder empezar a aplicar el valor de P1 en la ecuación, es por esto que se aprecia un switch, que da el paso al valor de P1 luego de darse la interrupción.

Existe otra forma de aplicar este modelo y es con una realimentación negativa, la cual se puede apreciar en la figura 10. En ella se observa señalada la parte de la realimentación.

Para explicarla se puede decir que lo que se hace es multiplicar la salida por una ganancia, lo que permite es ajustar o mejorar la gráfica del arco eléctrico, además se hace una adaptación para que la ganancia solo comience a actuar cuando se

dé la interrupción, debido a esto se hace una relación entre el tiempo y el valor de la interrupción, o el tiempo en que se da cambio al interruptor.

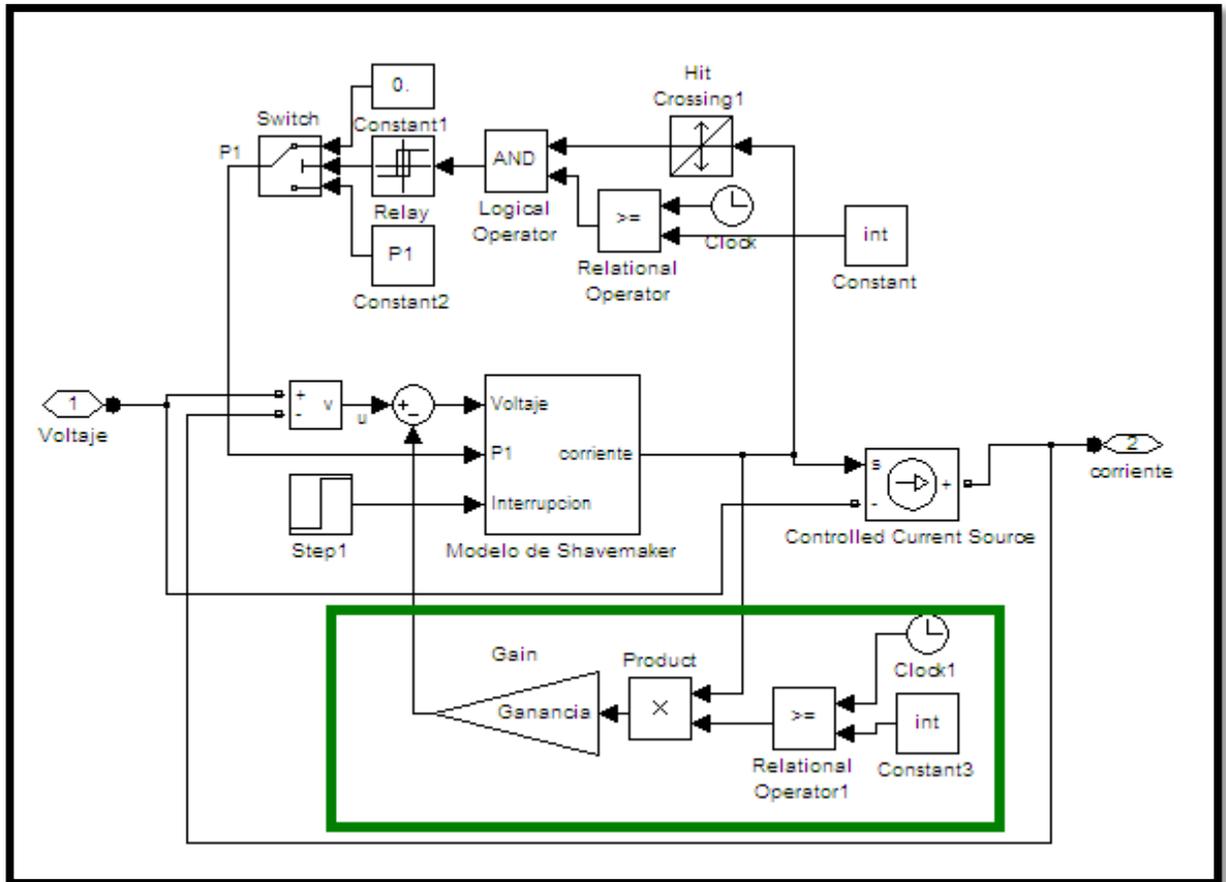


Figura 10 Realimentación Negativa en Shavemaker

La parte resaltada de color verde corresponde a la realimentación negativa. El valor de la ganancia puede variar, si la ganancia es mayor el cruce por cero se da en un tiempo menor, pero se dará un impulso o un voltaje grande antes de que pase por cero. Lo contrario ocurre si la ganancia es pequeña, ya que el cruce es más rápido comparado con los otros modelos, pero más grande que si se diera con una ganancia mayor, sin embargo el voltaje del arco será más pequeño.

Además de esta adaptación en Shavemaker, la siguiente figura enseña como son las entradas de las constantes del modelo de KEMA

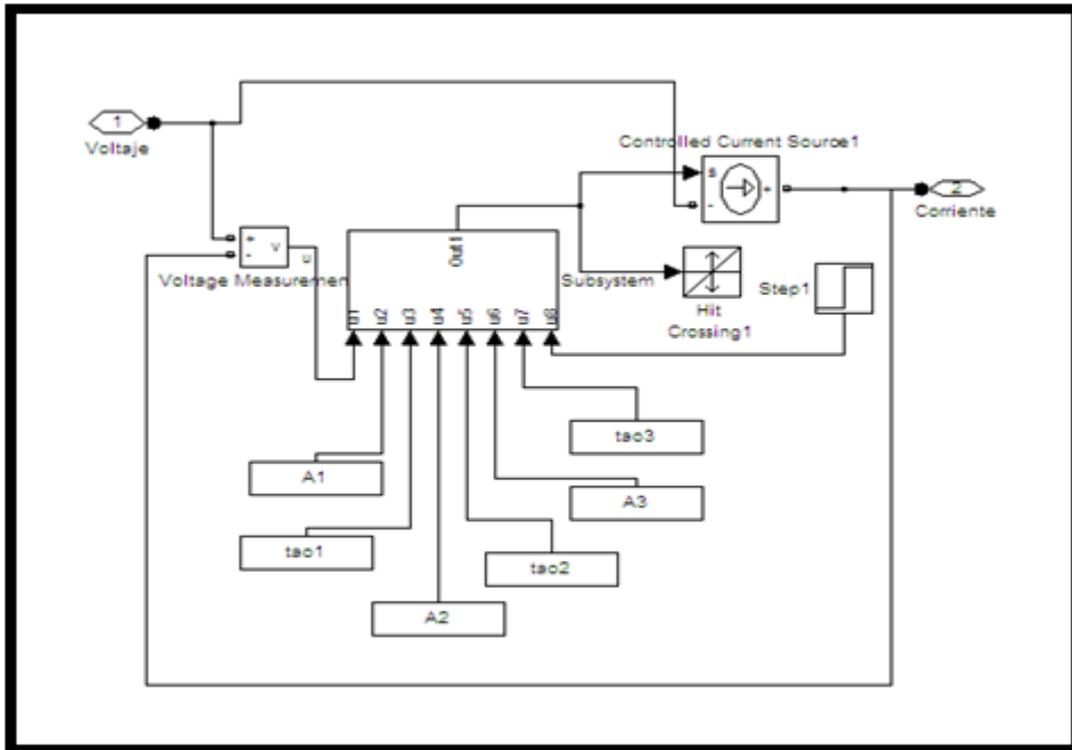


Figura 12 Modelo de Kema con diferentes entradas

Modelo de kema con diferentes entradas como constantes de las ecuaciones, el voltaje de entrada al sistema, el step necesario para la interrupción y como salida la corriente la cual corresponde a una ecuación tomada de la red en el documento guía AMBImportant.³⁹

³⁹ P.H Shavemaker; Arc Model Blokset: For Use With MATLAB Simulink and Power System Blockset. Delf Univer Technology, 2001.

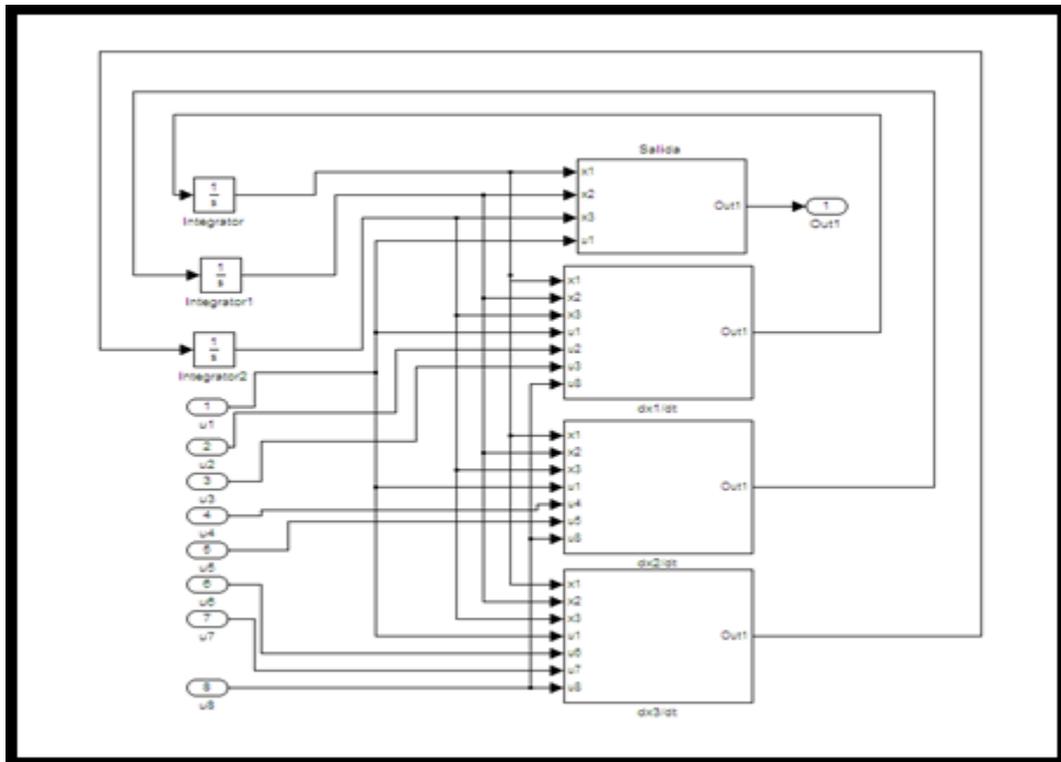


Figura 13 Modelo de Kema agrupado en diferentes subsistemas

Modelo de kema agrupado por diferentes subsistemas los cuales corresponden a fragmentos de cada ecuación debido a que existen pedazos similares y para generar una disminución de bloques se realizaron estos subsistemas.

A continuación se observara cada uno de los subsistemas.

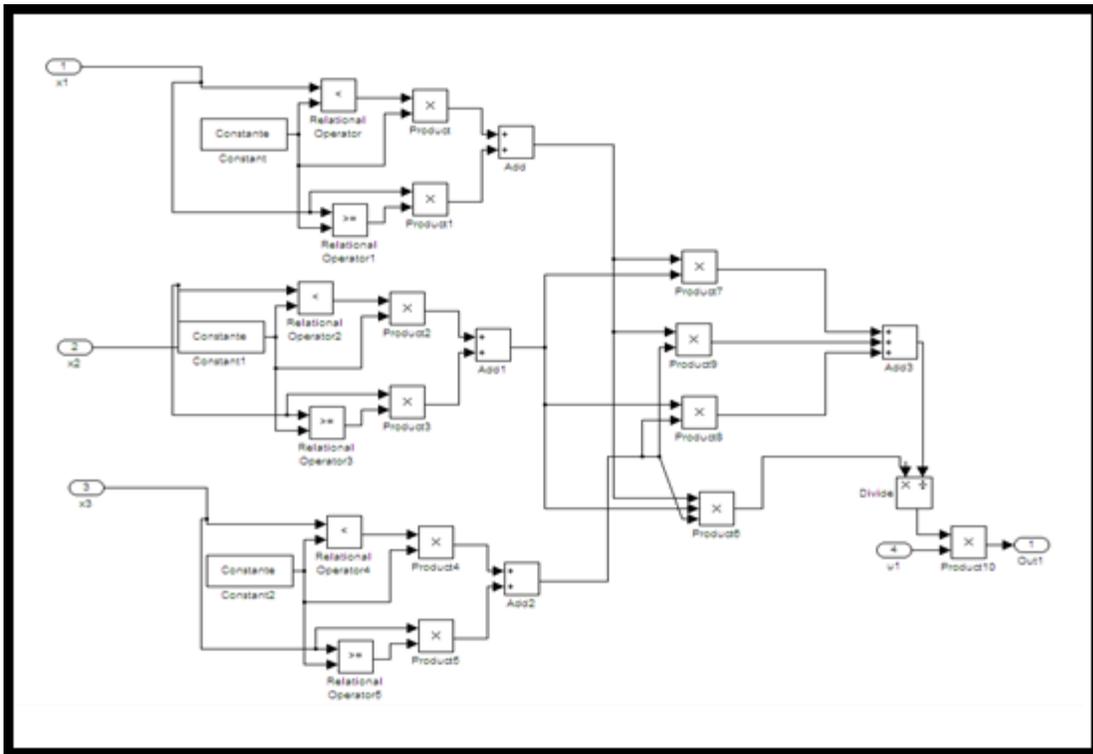


Figura 13.1 Modelo de Kema Subsistemas 1 Salida

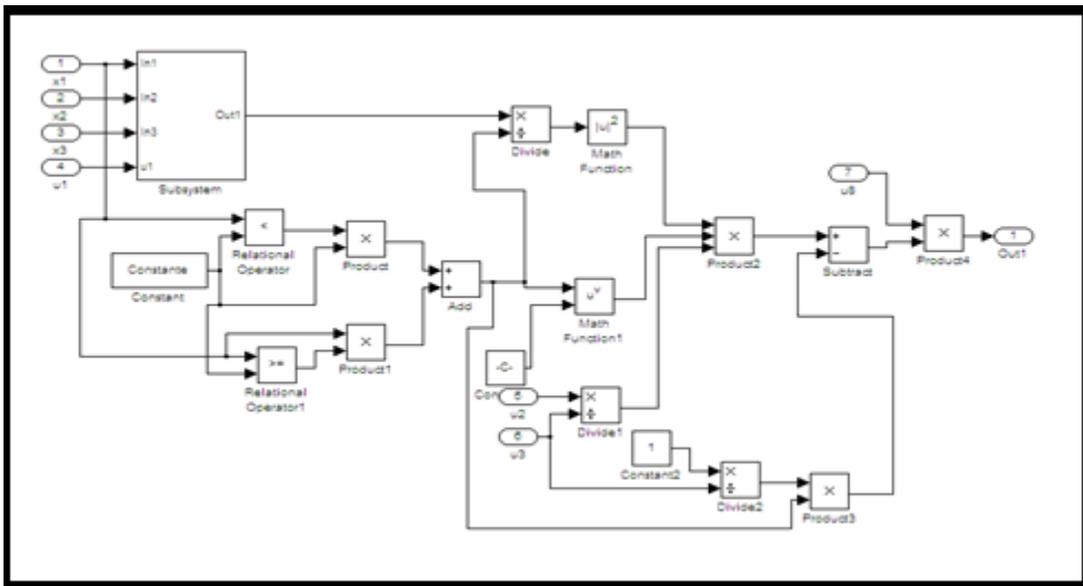


Figura 13.2 Modelo de Kema Subsistema 2. Derivada de la primera conductancia

El subsistema que se aprecia es la primera ecuación de G1, y el siguiente subsistema que es la salida del sistema la cual interactúa en la ecuación general.

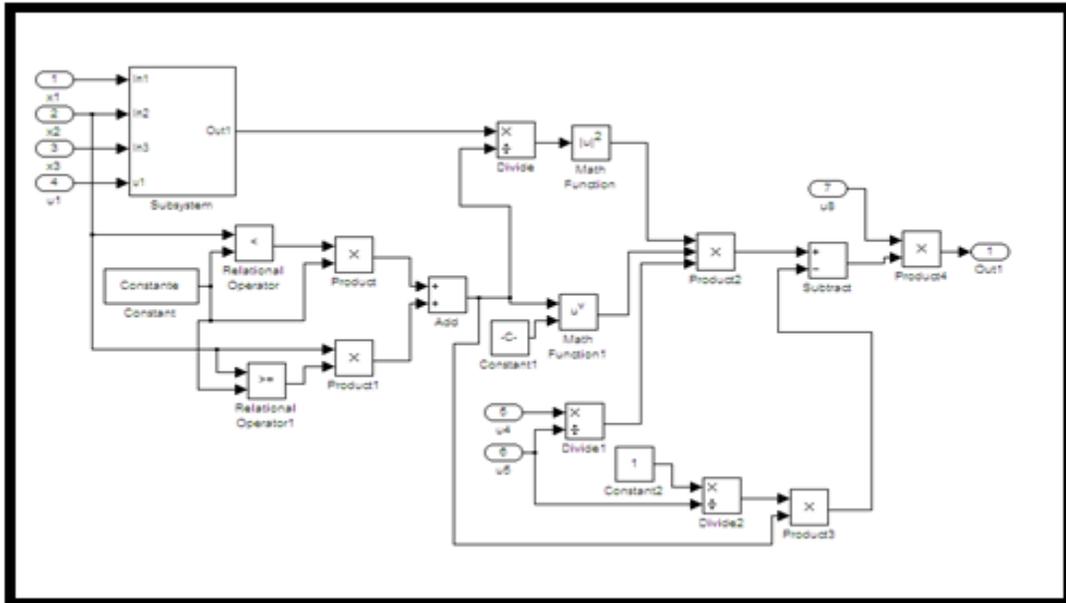


Figura 13.3 Modelo de Kema Subsistema 3 de la segunda conductancia

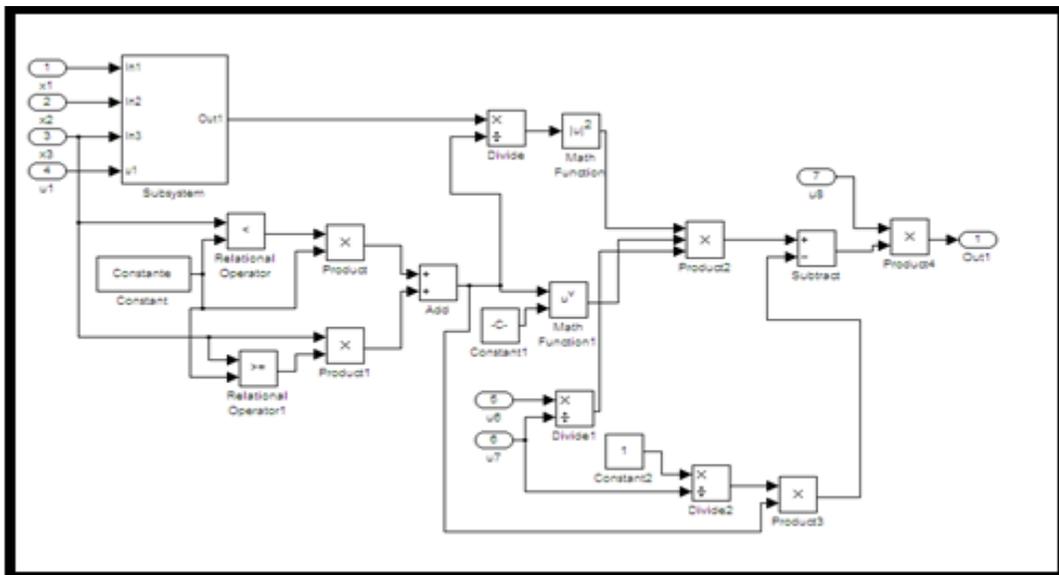
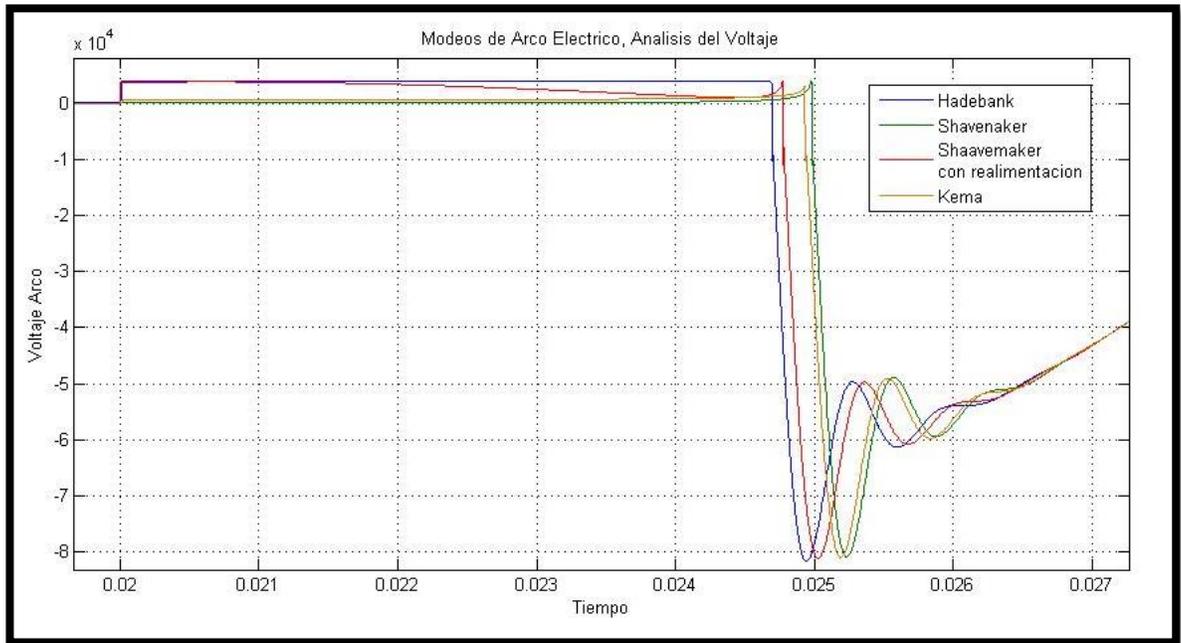


Figura 13.4 Modelo de Kema Subsistema 4. De la derivada de la tercera conductancia

6. ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Para iniciar, en la Gráfica 1, se puede apreciar los resultados obtenidos para el voltaje del arco en cada uno de los modelos.



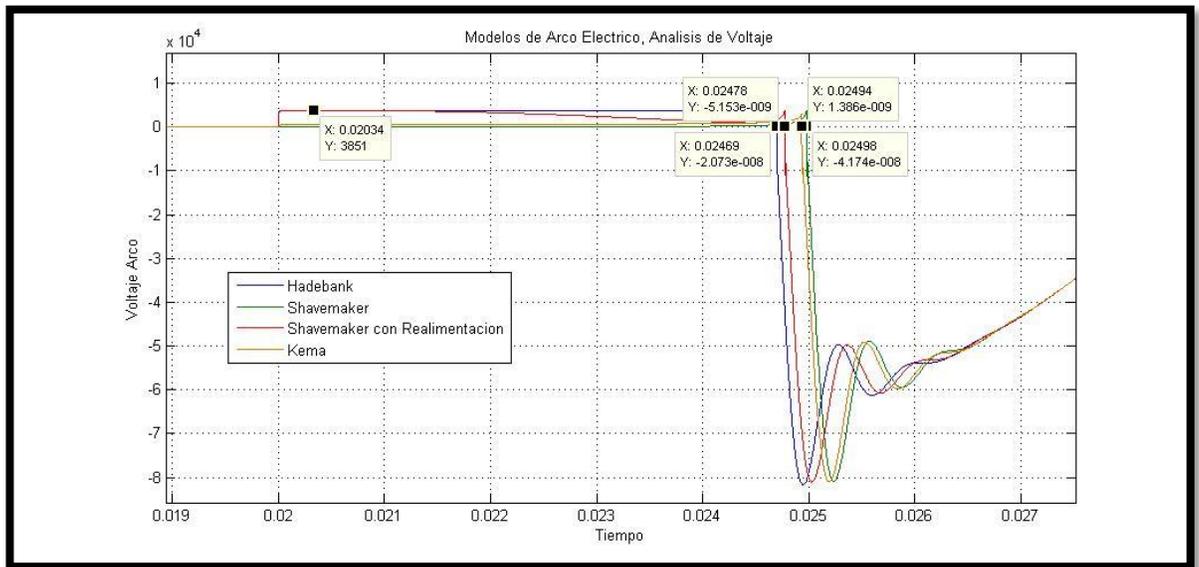
Gráfica 1 Voltaje de Arco en cada uno de los cuatro modelos

Observando la gráfica y el comportamiento después de la interrupción se puede apreciar lo siguiente, primero se puede decir que el modelo de Hadebank es el más rápido, el cual tiene un tiempo de cruce por cero de 0.02469 segundos, lo cual haría pensar que sería el mejor modelo, pero tiene algo que los otros tres modelos no presentan, y es que durante la interrupción pasa mayor tiempo que los demás con un voltaje casi constante que es muy grande, haciendo que durante una interrupción se presente un periodo de tiempo con un voltaje grande, el cual a pesar de ser de tiempos o intervalos pequeños, se puede presentar que para ciertos componentes pueden verse afectados negativamente, por lo que lo más recomendable es que este valor del voltaje vaya disminuyendo a medida que va pasando el tiempo.

Ahora, si se observa la gráfica de color rojo, la cual corresponde al modelo de Shavemaker con la realimentación negativa en su modelo, se puede ver que esta tiene un tiempo también menor, pero está por encima del tiempo de la anterior (Hadebank), con la diferencia de que este modelo en su respuesta en el voltaje del arco, si va bajando su valor a medida de que pasa el tiempo hasta llegar a un cruce por cero de un tiempo de 0.02478 segundos. Pero a pesar de que su voltaje va disminuyendo, es importante observar que durante la interrupción de este es mayor que el de los otros dos modelos.

Ahora por su parte el modelo de Shavemaker de color verde y el modelo de Kema de color amarillo son casi similares, lo cual se podría apreciar en la teoría, por lo tanto orienta la comprensión de que los modelos están actuando de manera correcta. Pero mirando con detalle esta respuesta se puede decir, que a pesar de tener un tiempo de cruce por cero mayor al de los otros dos modelos, si se puede apreciar cómo durante la interrupción el voltaje tiene un aumento por debajo de los otros dos modelos, lo que hace pensar en la necesidad de recurrir a alguna protección para los componentes eléctricos. Los tiempos de cruce por cero para cada uno de los modelos son de 0.02494 segundos para el modelo de Kema y de 0.02498 segundos para el modelo de Shavemaker.

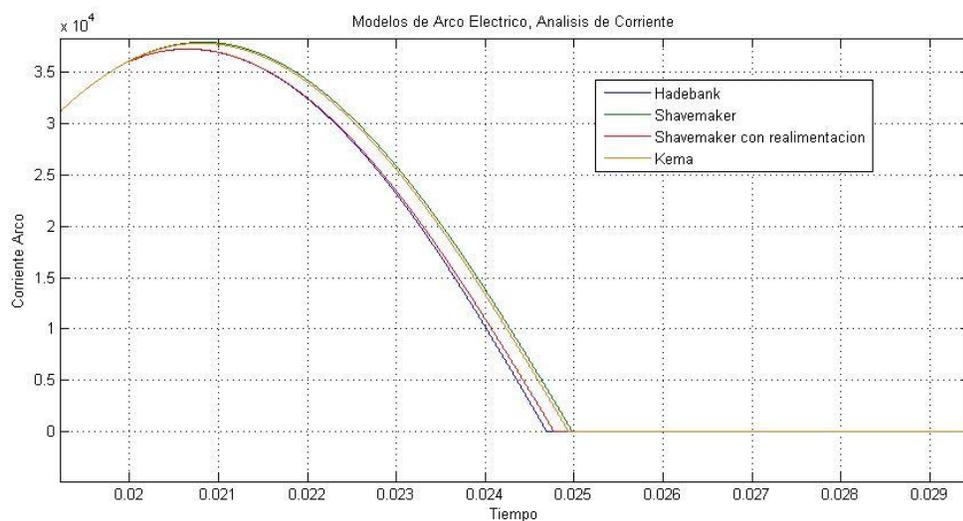
De acuerdo a la gráfica el voltaje para cuando se da el momento del cruce por cero. En este sentido esta Gráfica muestra la veracidad de los tiempo de cruce por cero.



Gráfica 2 Modelos de Arco Eléctrico, Análisis de voltaje

Después de realizar el análisis con el voltaje, se puede proceder a observar la corriente, para poder determinar de manera gráfica la mejor respuesta de los modelos y de esta manera saber cuál es el mejor modelo para ser tenido en cuenta durante la implementación de arcos eléctricos.

En la gráfica 3. Se puede apreciar el resultado de la corriente



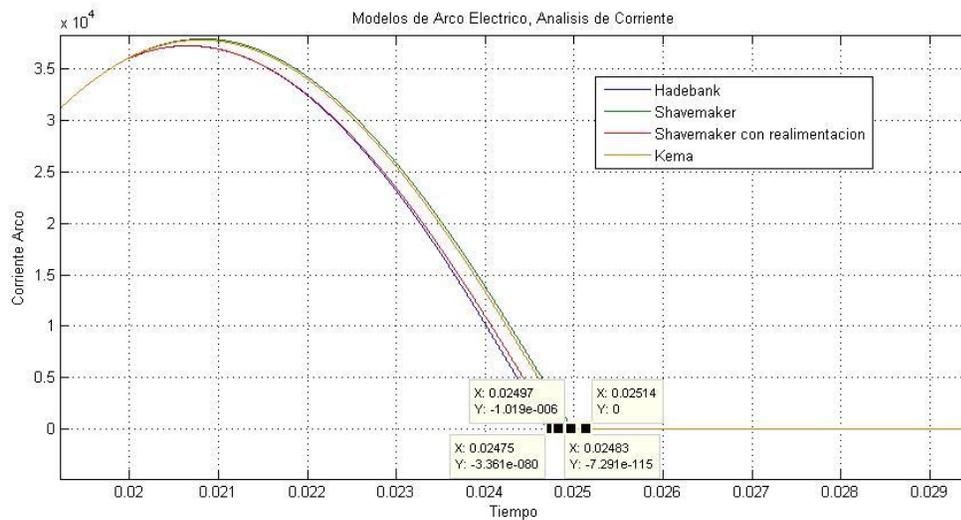
Gráfica 3 Modelos de Arco eléctrico, análisis de corriente

En esta gráfica, se puede apreciar claramente como los modelos son casi agrupados de a dos, es decir que dos modelos son similares y los otros dos son similares entre sí, dando a entender que el modelo de Shavemaker puede ser similar a cada uno de los modelos.

En el caso de la corriente ocurre lo contrario, el modelo de Hadebank y el modelo de Shavemaker con realimentación negativa, tiene una corriente pico menor que la de Kema y Shavemaker, lo que da a entender que es mejor el uso de los dos primeros modelos nombrados, ya que no tienen corrientes tan elevadas, además de que sus tiempos de cruce por cero o de llegada a cero, porque la corriente en la interrupción busca el cero, debido a que se está interrumpiendo, lo cual hace que se genere un circuito abierto y de esta manera la corriente es cero. De acuerdo a lo Gráficoado se puede apreciar los tiempos de llegada a cero, los cuales varían, pero se asemejan de a dos.

Para el modelo de Hadebank, se tiene un tiempo de 0.02475 y para Shavemaker con realimentación de 0.02497 segundos. Por su parte del modelo de Kema tiene un tiempo de 0.02483 y el de Shavemaker de 0.02514 segundos, de acuerdo a estos tiempos, se puede decir que el modelo de Shavemaker sería el peor.

Pero de acuerdo a todas estas respuestas, el mejor modelo simplemente se da, de acuerdo a la circunstancia en que se esté usando, ya que podría existir la posibilidad de que un sistema no se afecte por cambios bruscos de corriente, pero por cambios de voltaje si, o que un control pueda verse afectado por aumentar la corriente a un tal valor, pero no importa el valor del voltaje, todas estos casos generan incertidumbre en lo que sería un buen modelo. Pero lo que sí está claro es que el modelo de Shavemaker con realimentación negativa, puede satisfacer en todos los casos, ya que con cambios en los parámetros de la ganancia de realimentación el resultado del voltaje y de la corriente pueden variar, generando de esta manera una respuesta deseada para cada una de las circunstancias en que se vaya a usar.



Gráfica 4 Análisis de cambio de parámetros para cada uno de los modelos

Cambios de Parámetros Para la Observación

Primero el código de matlab usado para realizar la simulación simultanea del circuito con el modelo de Hadebank y algunos parámetros cambiados. A continuación se muestra el algoritmo usado para cada modelo, y más adelante se muestran los parámetros que fueron cambiados, según las necesidades del modelado.

Algoritmo 1. Cambios en parámetros de Hadebank

Hadebank

Valores1

$\tau_{c}=1.2e-6;$

$\tau_{m}=0.3e-6;$

$U_{c}=3850;$

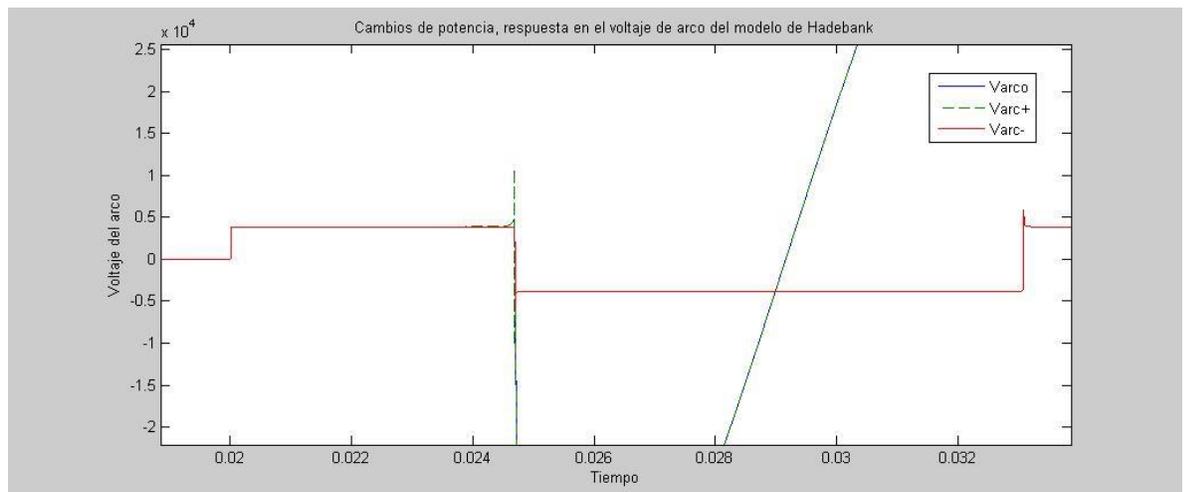
$P_{o}=30900;$

Valores2

tao_c2=1.2e-6;
tao_m2=0.3e-6;
Uc2=3850;
Po2=309000;

Valores3

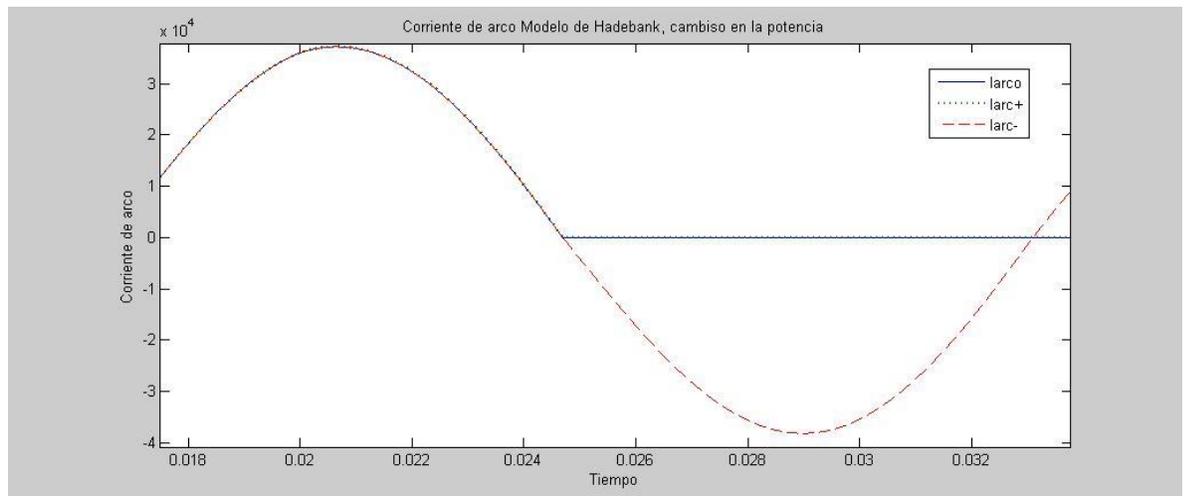
tao_c3=1.2e-6;
tao_m3=0.3e-6;
Uc3=3850;
Po3=3090;



Gráfica 5 Cambios de Potencia, Respuesta en el voltaje Modelo de Hadebank

En la anterior gráfica se observa el resultado presentado de color verde cuando se aumenta el voltaje de arco, en el momento en que se presenta la apertura del interruptor, su comportamiento en un tiempo muy pequeño, es un pulso de voltaje.

Por su parte la linera roja muestra cómo se presenta la apertura del interruptor para un valor de voltaje de arco menor al estándar, más adelante se observa que se comporta como una onda rectificada.



Gráfica 6 Modelo de Habedank, corriente contra potencia

Cambios de parámetros de los modelos de arco eléctrico

Hadebank

Valores1

$\tau_{c1}=1.2e-6;$

$\tau_{m1}=0.3e-6;$

$U_{c1}=3850;$

$P_{o1}=30900;$

Valores2

$\tau_{c2}=1.2e-6;$

$\tau_{m2}=0.3e-6;$

$U_{c2}=3850;$

$P_{o2}=309000;$

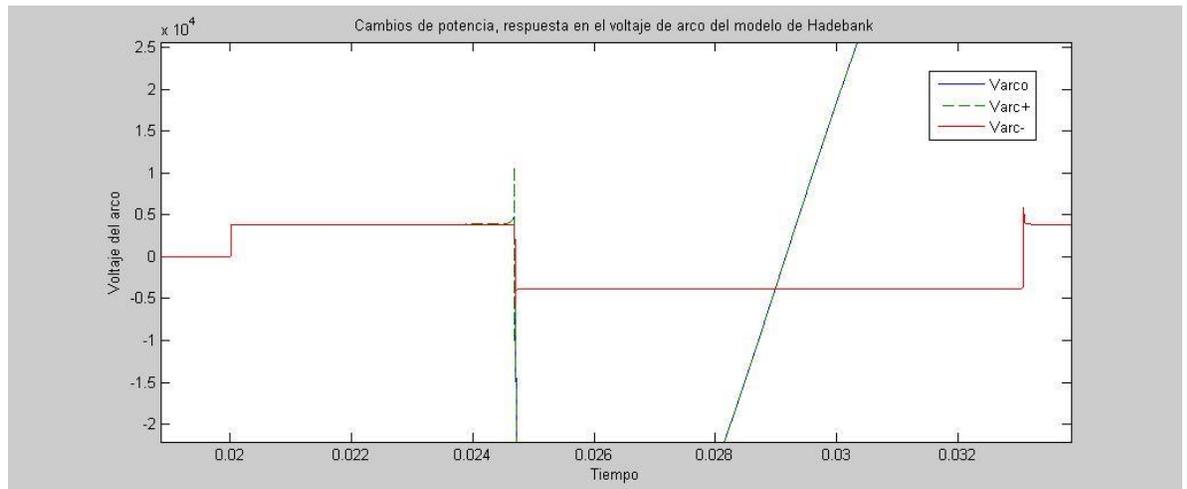
Valores3

$\tau_{c3}=1.2e-6;$

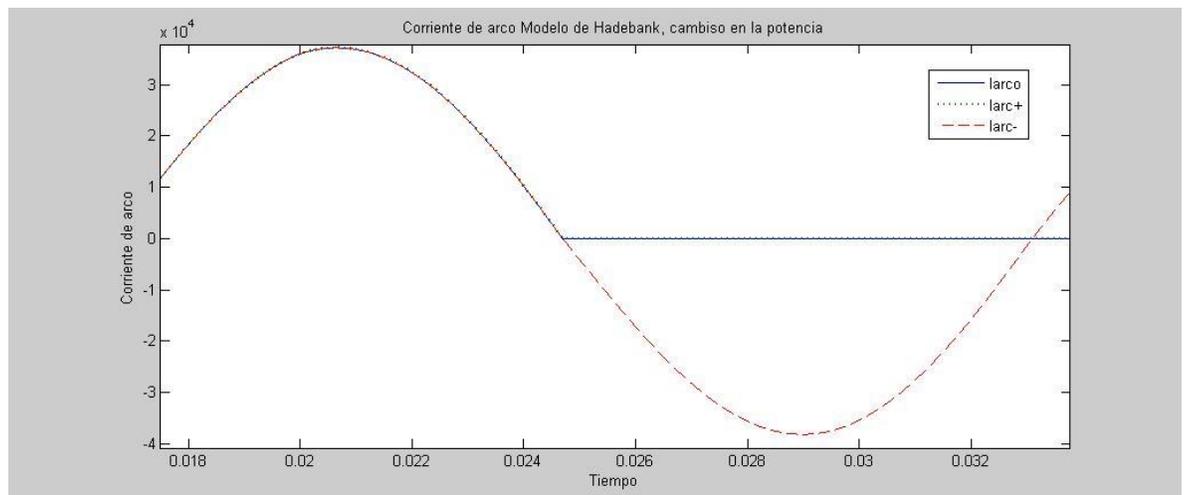
$\tau_{m3}=0.3e-6;$

$U_{c3}=3850;$

$P_{o3}=3090;$



Gráfica 7 Cambios de voltaje contra potencia, Modelo de habedank



Gráfica 8 Modelo de Habedank cambios corriente contra potencia

En las anteriores dos gráficas se puede apreciar los resultados que se obtienen de cambiar algún parámetro de la ecuación de Hadebank. Para las primeras lo que se realiza es un cambio en valor de la potencia, el cual esta explícito en el anterior

algoritmo, generando de esta manera que una disminución de la potencia genera afectación directa en el comportamiento del modelo, ya que presenta comportamientos diferentes al de valores iniciales, dando para el voltaje un comportamiento de un pulso que se repite, por su parte para la corriente se aprecia como la onda sigue su rumbo sin presentarse ninguna interrupción.

Cambios Voltaje Uarc

tao_c=1.2e-6;

tao_m=0.3e-6;

Uc=3850;

Po=30900;

tao_c2=1.2e-6;

tao_m2=0.3e-6;

Uc2=38500;

Po2=30900;

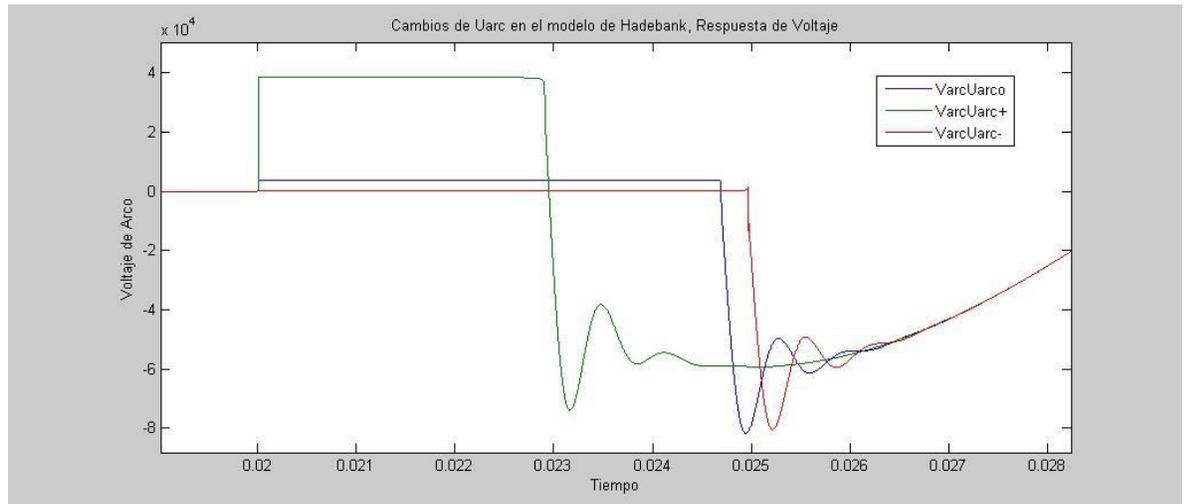
tao_c3=1.2e-6;

tao_m3=0.3e-6;

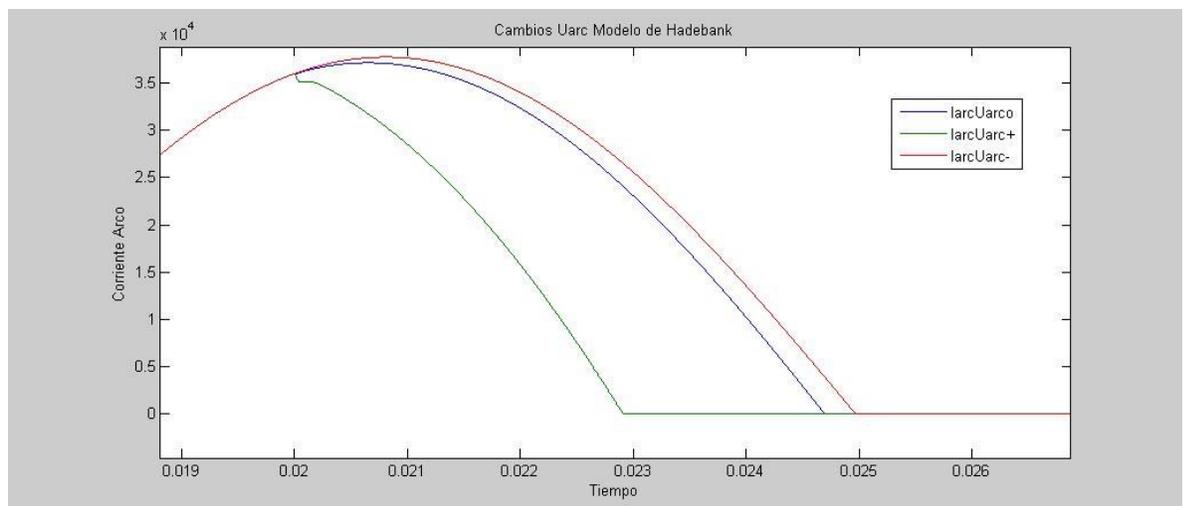
Uc3=385;

Po3=30900;

Gráficas



Gráfica 9 Modelo de Hadebank, Respuesta de voltaje



Gráfica 10 Cambios en la Corriente del Arco

Las anteriores dos gráficas presentan los resultados después de cambiar el voltaje de arco inicial, el cual genera cambios en el voltaje y corriente pero todas son coherentes y funcionales, simplemente el voltaje crece o el tiempo es más rápido o menor que el de valores iniciales. Si se analizan las gráficas comparativamente, una con la otra, es decir, las gráficas Nos. 9 y 10 respectivamente, se puede apreciar como cuando se aumenta U_{arc} la respuesta del voltaje de arco es más rápida pero con un esfuerzo o crecimiento de voltaje mucho mayor por un período

importante de tiempo. Caso contrario ocurre cuando se disminuye el voltaje U_{arc} ya que este hace que el voltaje sea menor pero que su tiempo de cruce por cero sea mucho mayor, generando de esta manera un mayor esfuerzo a los sistemas.

Simplemente para la corriente se puede apreciar como cuando U_{arc} es mayor esta llega a cero más rápida sin necesitada de hacer un semiciclo de la onda, sino que mucho antes se estabiliza en cero, caso contrario con U_{arc} menor, ya que esto provoca más demora en el cruce o estabilización de la corriente, que para esto casos se da en cero, ya que es el resultado después de generar una interrupción en el sistema.

Shavemaker

Primero el algoritmo con los valores que se cambiaron si estos se comparan con los valores presentados en los análisis hechos en las gráficas números 1, 2 , 3 y 4.

Algoritmo 2. Cambios en Shavemaker

%% Parámetros del modelo de Shavemaker

%% Parámetros Iniciales

taos=0.2e-6;

Po=15000;

P1=0.995;

U_{arc} =0;

int=0.02;

Ganancia=0.1;

%% Parámetros por encima

```
taos2=0.2e-6;  
Po2=15000;  
P12=100;  
Uarc2=0;  
int=0.02;  
Ganancia=0.1;
```

%% Parámetros por debajo

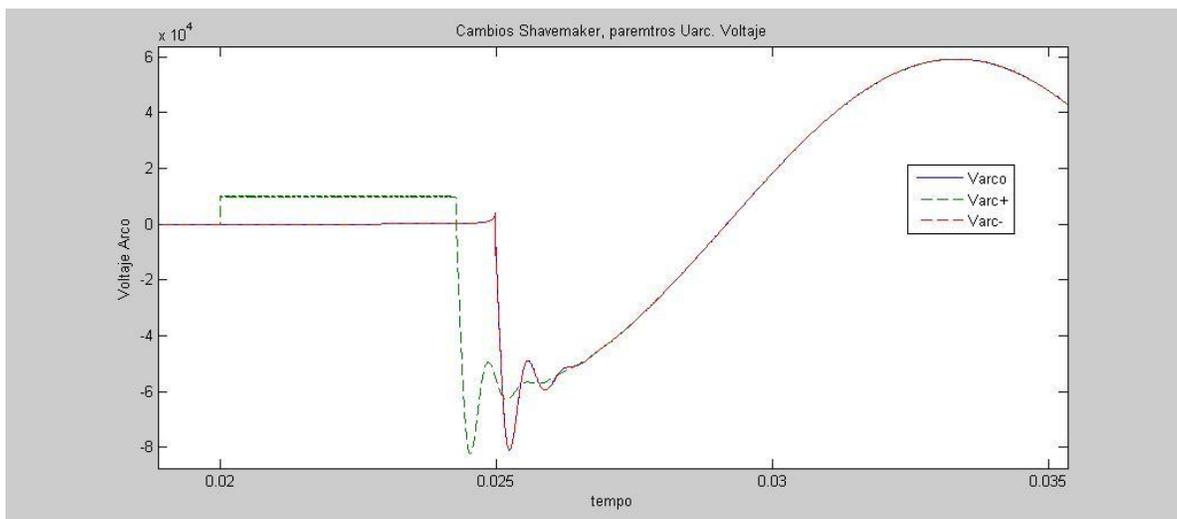
```
taos3=0.2e-6;  
Po3=15000;  
P13=0.1;  
Uarc3=0;  
int=0.02;  
Ganancia=0.1;
```

En el algoritmo solo se puede apreciar el cambio en P1, pero para Po, lo que se hizo fue aumentar dos ceros en su valor inicial y disminuir dos ceros para graficar y comparar parámetros por encima y por debajo; mientras que para Uarc, se hizo un aumento de 10 y disminución de 0.1 para hacer el mismo análisis, a continuación se puede apreciar los resultados obtenidos.

Para las gráficas 4 y 5, se puede apreciar la respuesta del voltaje y de la corriente al realizar cambios por encima y por debajo del valor inicial.

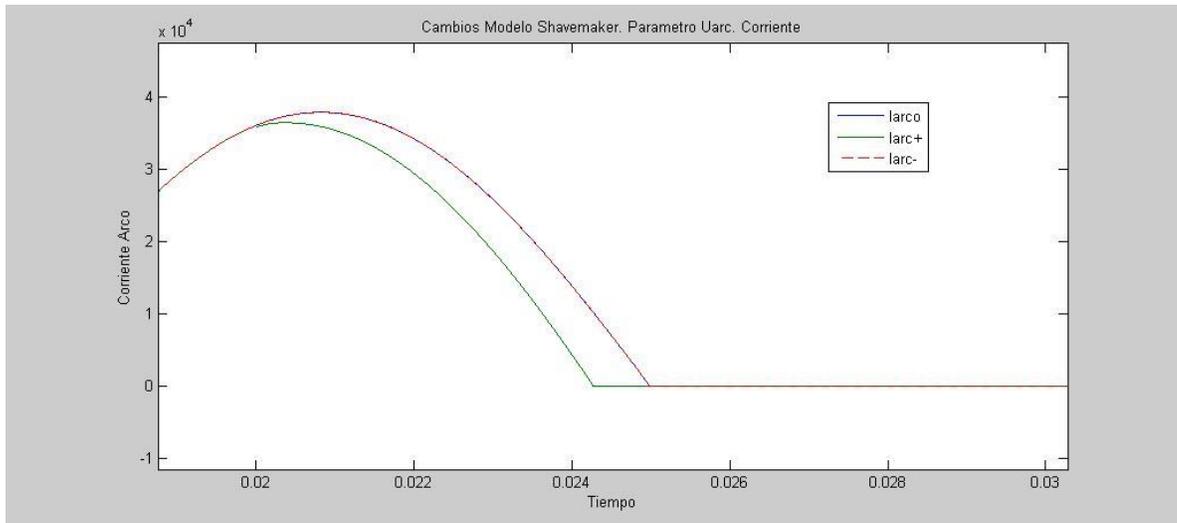
Para el voltaje se puede apreciar cómo aumentar U_{arc} provoca que durante la interrupción el voltaje crezca demasiado, a pesar de que su tiempo de cruce por cero es menor con U_{arc} mayor, el problema radica en que el voltaje crece demasiado, provocando de esta manera dudas o inconvenientes en el caso de usar componentes o sistemas que no resistan mucho voltaje.

Por su parte si se trata de bajar U_{arc} , el cambio no se notara, se apreciara como la respuesta será igual que valores iniciales, determinando de esta manera que la única forma de afectar la respuesta inicial es aumentando el voltaje inicial de arco, llamado en las ecuaciones de Shavemaker, U_{arc} .



Gráfica 11 Modelo de Shavemaker, Cambios en Salida de Voltaje

Con la corriente ocurre lo contrario, si se aumenta U_{arc} el valor de la corriente pico es menor y su respuesta es mejor, ya que tiene un cruce por cero casi instantáneo, permitiendo de esta manera la protección de equipos y de componentes, por lo tanto en caso de necesitar una respuesta rápida, aumentar el voltaje U_{arc} puede satisfacer esta necesidad.



Gráfica 12 Modelo de Shavemaker, cambios corriente del arco

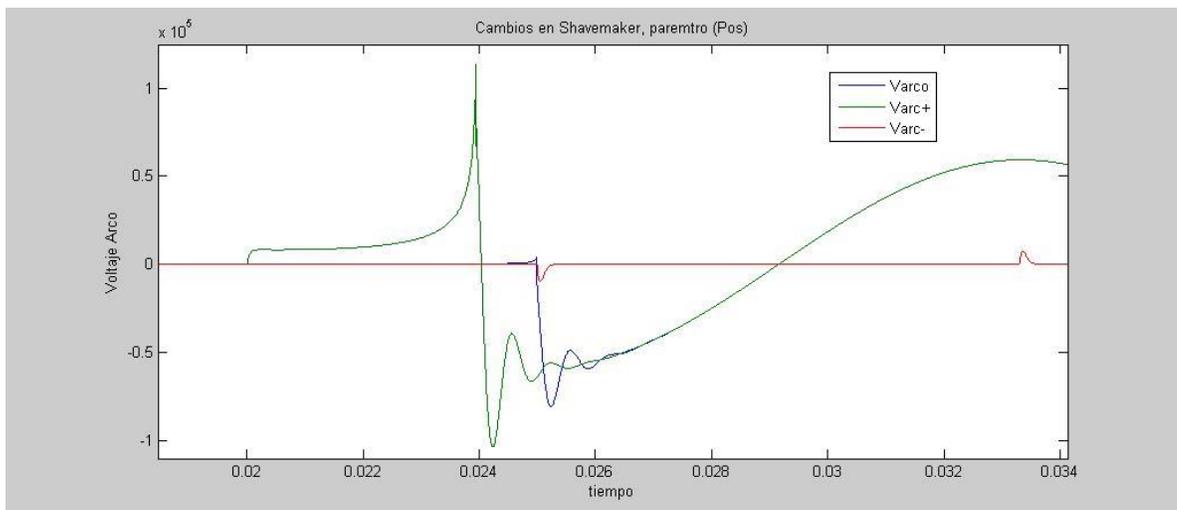
Además de cambiar este parámetro, también se puede cambiar otros dos parámetros como P_0 y P_1 , primero se puede apreciar los resultados para P_0 .

Después de aumentar el valor de P_0 y de disminuir este, se tienen las siguientes respuestas, las cuales pueden ser vistas en las gráficas 6 y 7, para el voltaje de arco y corriente de arco respectivamente.

Para el voltaje se puede observar como al aumentar P_0 , genera un pico muy elevado de voltaje, es decir durante la interrupción el voltaje comienza a subir de manera exponencial hasta llegar a un punto y baja rápidamente. Esta respuesta se da más rápida que para los otros casos, pero esto puede provocar efectos negativos en una implementación, ya sea por lo que se ha venido comentando o por un esfuerzo del sistema de energía.

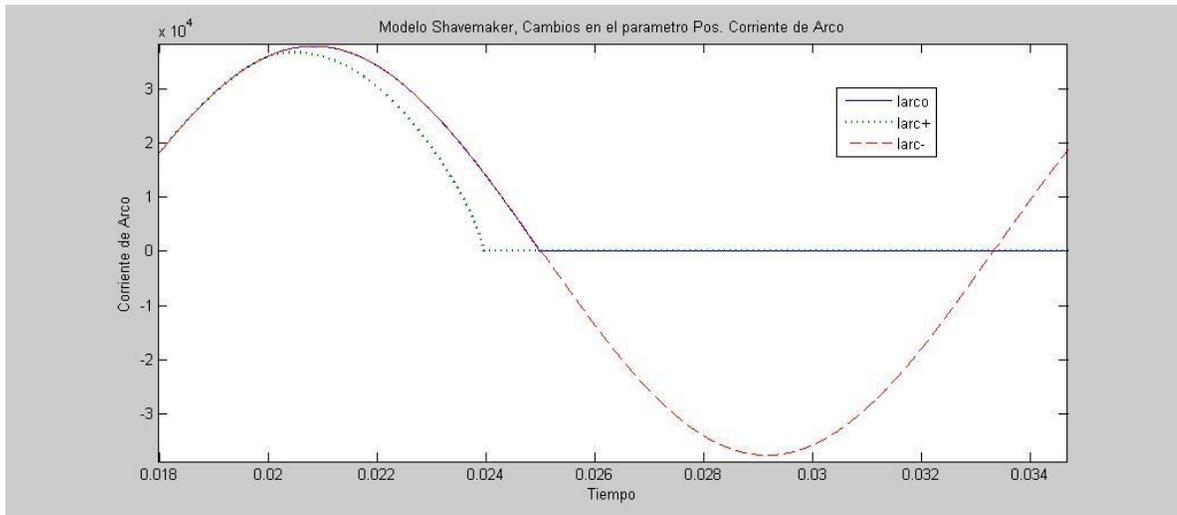
Por otro lado si se disminuye el valor, el resultado será una especie de pulso, lo cual no es adecuado, ya que después de la interrupción la señal de voltaje debe ser la onda seno, y en la figura roja, se aprecia como esto no se presenta, simplemente se observa un ciclo de una figura desconocida, que puede ser

asociada a un pulso. Esto puede ser explicado de la siguiente manera, los modelos son de arcos eléctricos, por lo tanto son valores de potencia grandes, no pequeños, por lo tanto al disminuir este valor no se genera una salida como debe ser, y por lo tanto el modelo no estaría funcionando como debe ser, en conclusión este cambio no genera mejoras, sino que simplemente deja de funcionar el modelo.



Gráfica 13 M. Shavemaker cambios tiempo contra voltaje

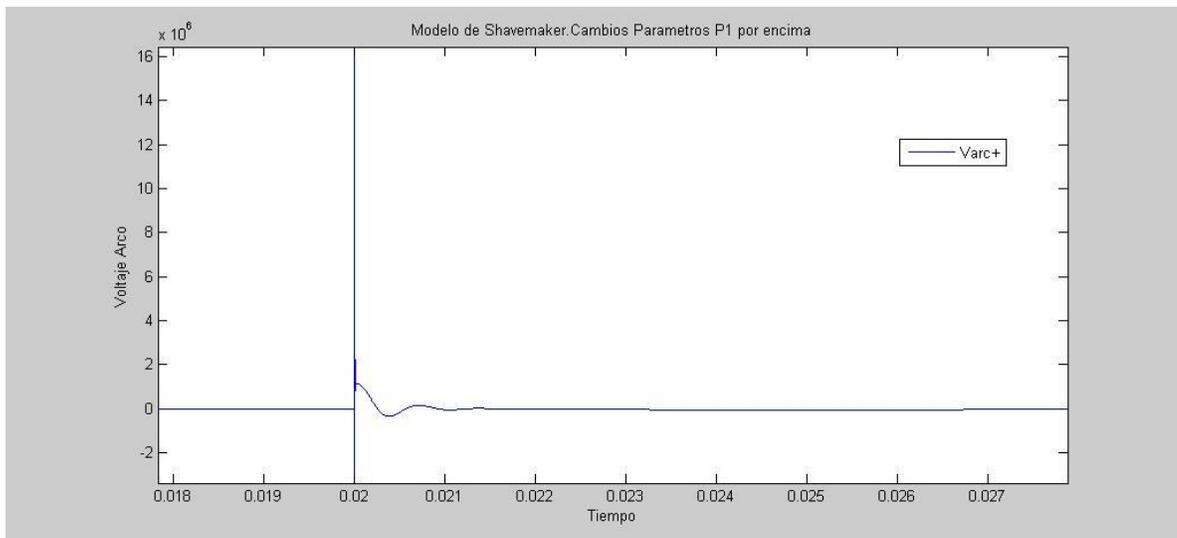
Por su parte la corriente, como es de esperarse para un voltaje grande, debe tener una corriente menor, y un tiempo menor, dando posibilidad de que aumentar la potencia pueda ayudar a mejorar la corriente, siempre y cuando la respuesta del voltaje no genere inconvenientes en los sistemas. Por su parte disminuir la potencia, no genera acción ninguna, ya que simplemente en la gráfica roja punteada, sigue el seno sin importar la interrupción, es decir no está actuando nada.



Gráfica 14 Corriente del arco en tiempo

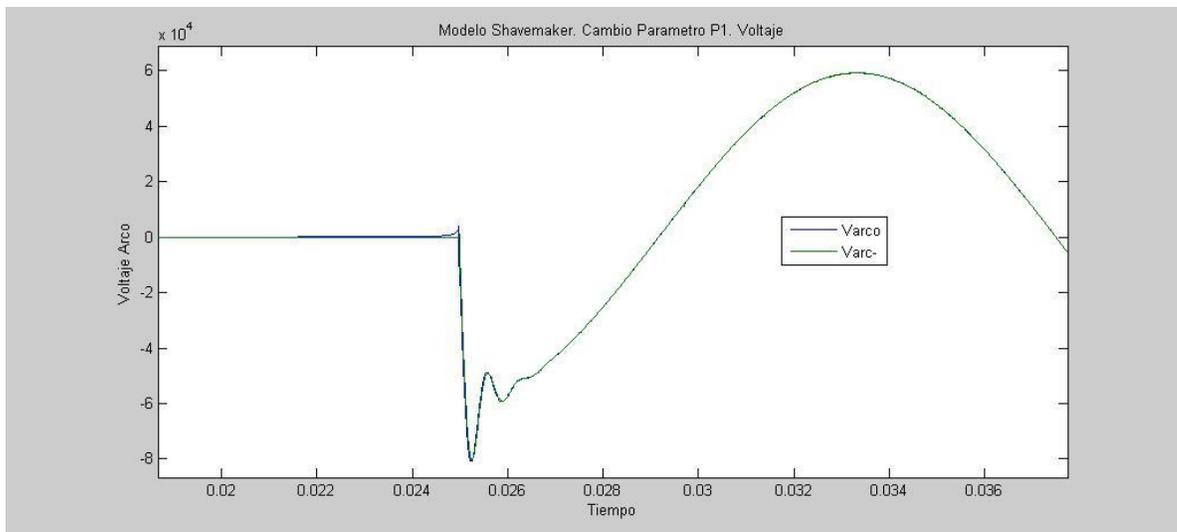
Cambios en P1

Por su parte para la variable P1, al realizar cambios por encima y por debajo, se puede apreciar las siguientes respuestas. La primera cuando es por encima (Gráfica 8) el voltaje tiene un impulso grande en el momento de la interrupción y luego decrece hasta quedar oscilando con valores pequeños cerca de cero, con solo ver el impulso se puede decir que este cambio del parámetro de potencia P1 no es favorable.



Gráfica 15 Cambios M. Shavemaker, P1 Mayor

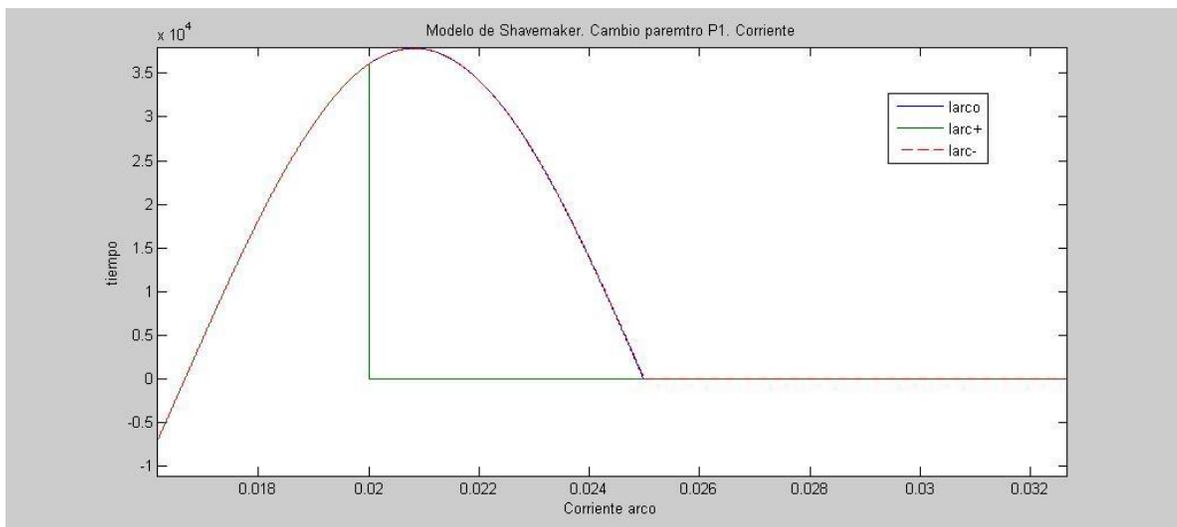
Ahora si se disminuye P1 no afecta demasiado, ya que el voltaje es similar o casi igual al de los parámetros iniciales, por lo tanto bajar P1 no afecta el modelo ni negativo ni positivamente.



Gráfica 16 Cambios Shavemaker, P1 menor

Gráfica 9. P1 Inicial y P1 Menor

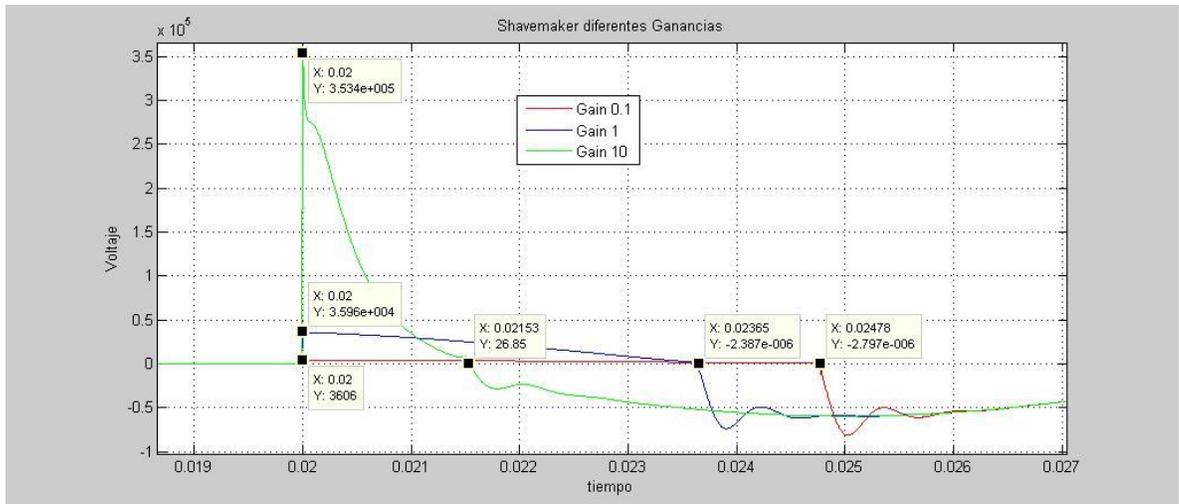
Los cambios en la corriente solo se dan cuando el valor de p1 es mayor, y corresponde a una respuesta instantánea de la corriente, en el momento de hacer la interrupción la corriente cae casi que en el mismo tiempo y llega a cero, respuesta ideal, pero no requerida, porque los equipos reales no deben tener estas respuestas, sino que deben ser caídas suaves, que permitan el reconocimiento del cambio a los sistemas eléctricos.



Gráfica 17 Cambios en la corriente Shavemaker

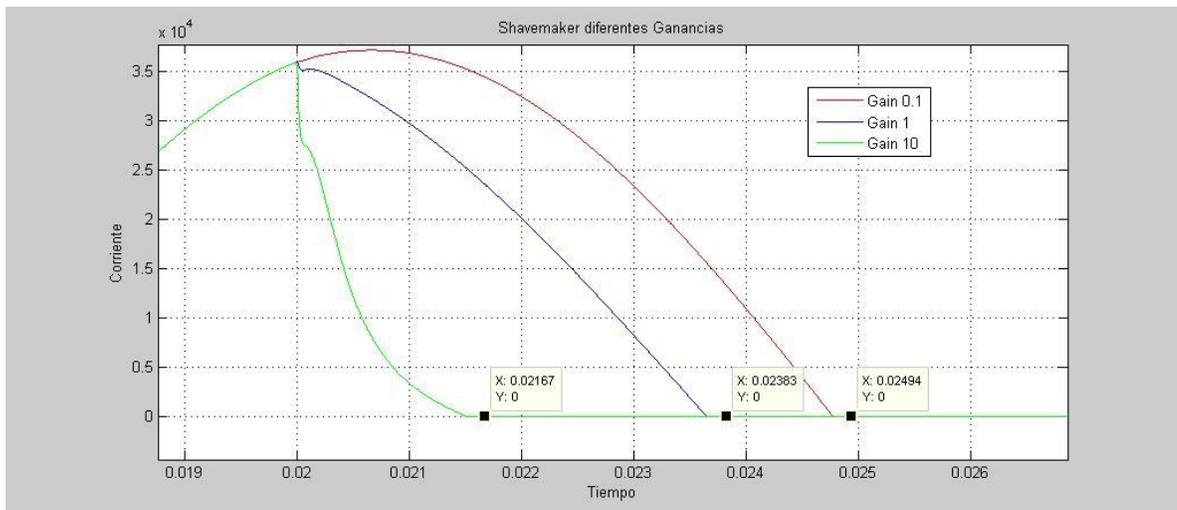
Gráfica 10. Corriente, cambios P1

Shavemaker Ganancias (Realimentación)



Gráfica 18 Ganancias Shavemaker, Voltaje

Para realizar el análisis de las ganancias, se escogieron 3 ganancias, $X=0,02$; $Y=3,634$ para la ganancia 10, $X=0,02$ $Y=3,3606$ para la ganancia 1 y $X=0,02$; $Y=3,59$ para la ganancia 0,1. Luego se procedió a realizar la simulación y se obtuvo la gráfica 11, con esta se puede decir que a medida que se aumenta la ganancia el tiempo de cruce por cero es menor, pero el voltaje tiene picos mucho más grandes, por su parte si el caso es el contrario, ganancias pequeñas, se va obtener que el voltaje en su mayor pico, va ser mucho más pequeño, pero el tiempo va ser mayor, en la gráfica se puede detallar los valores del tiempo y del voltaje respectivamente, con estos valores se puede apreciar los cambios en las cantidades.



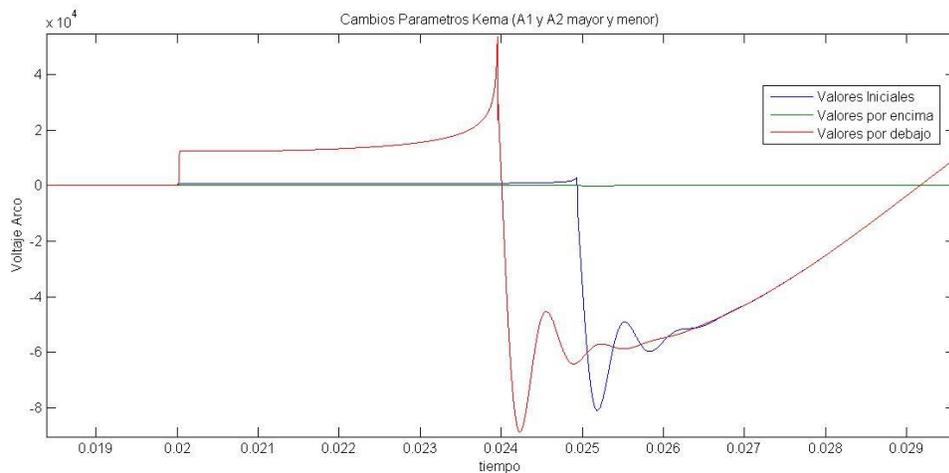
Gráfica 19 Corriente ganancias Shavemaker

Por su parte la corriente tiene un comportamiento contrario, a mayor ganancia la corriente es menor y el tiempo de cruce por cero es más rápido, y si la ganancia es mayor ocurre lo inverso, mayor corriente y mayor tiempo, pero esta respuesta es menos negativa en algunos casos que la de ganancia 10, ya que como se ha venido diciendo, cambios bruscos pueden afectar un sistema, además la teoría muestra respuesta con una curva similar a la onda sinusoidal, es por esto que se puede decir que sería mejor una ganancia menor que una mayor a la unitaria.

Kema

Inicialmente el modelo de Kema tiene 9 parámetros para modificar, de los cuales se realizaron cambios solo en A1, A2 y en las k, ya que estas generan alteraciones de manera implícita con respecto a los demás valores, ya que están en las diferentes ecuaciones del modelo de arco eléctrico.

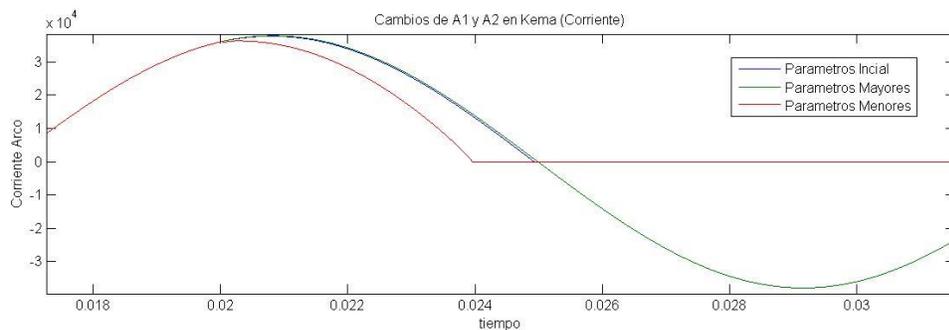
Primero se hizo el análisis cuando se cambia el parámetro A1 y A2 al mismo tiempo por encima y por debajo



Gráfica 20 Nivelación del voltaje M. Kema

En la anterior gráfica, se puede apreciar como el voltaje tiene una respuesta casi de una línea recta, para el caso en que A1 y A2 están por encima de los valores iniciales, lo que hace deducir que aumentar estos parámetros generan inconvenientes en el modelo, lo cual es cierto, porque en la imagen de la corriente se puede apreciar cómo ésta no se comporta como debe ser su estado óptimo.

Por su parte cuando los parámetros están por debajo, provocan que el voltaje tenga un tiempo menor de cruce por cero, pero el voltaje va ser mucho mayor, con un pico más elevado que para los otros dos casos.



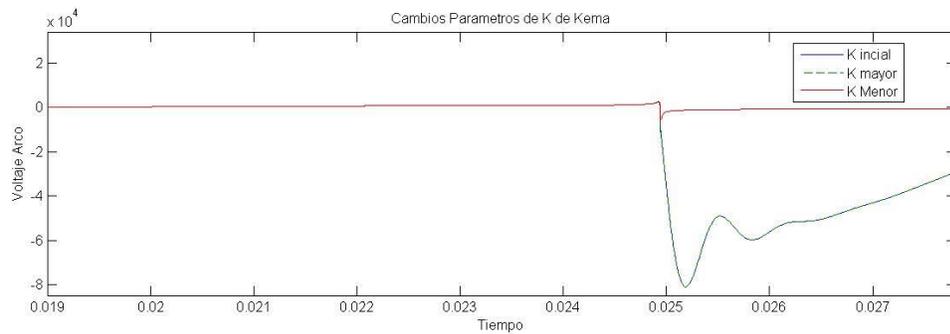
Gráfica 21 M. Kema, variación en corriente

Los mismos cambios pero para la corriente, generan la siguiente Gráfica, en ella se puede apreciar cuando los parámetros son mayores a los iniciales se genera

una señal que cuando toca cero, no se queda ahí, sino que sigue la onda senoidal, por lo tanto se puede decir que el modelo con parámetros mayores en A1 y A2 no funcionan, no son operables.

Por otro lado, para parámetros menores, se puede decir que la respuesta si es coherente, ya que cuando se hace la interrupción la señal, sigue su rumbo y cuando llega a cero, se queda allí, ya que durante la interrupción, la corriente no debe seguir con valores, además el tiempo de llegada o cruce por cero, es mucho más rápido que para condiciones iniciales.

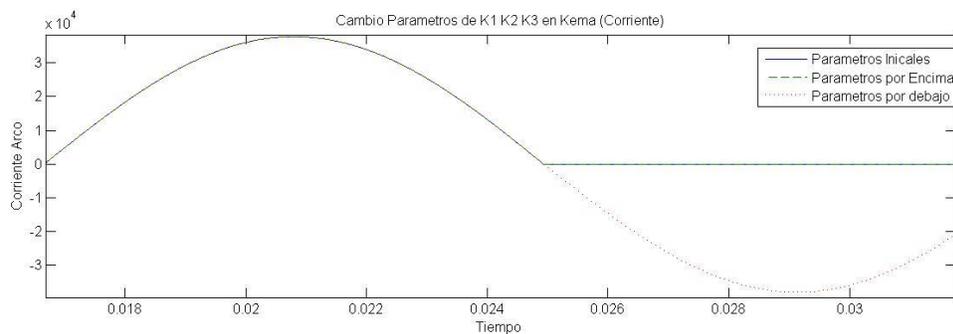
Por otro lado cuando se cambia las k del modelo, se tiene los siguientes resultados:



Gráfica 22 Kema, variaciones de voltaje

Para el caso de k menor, la respuesta no se genera como debe ser, por lo tanto se puede decir que este parámetros no funciona como debe ser; por su parte cuando las k es mayor al inicial, solo algunas décimas, ya que cuando se ponen valores grandes, la simulación no funciona, y esto se debe a que se afecta la restricción de $1e.-10$, es decir en las conductancias este valor muchas veces no puede ser mayor, es por lo anterior que en la bibliografía y en la implementación de este modelo, se puede apreciar como durante la implementación se realizan restricciones de este valor, ya sea para comparar con otra variable y de esta manera poder realizar la función adecuada del modelo.

Esta restricción es dada por el autor de la guía de modelos de arco. Cuando el cambio de k es por encima, es decir, cuando el k inicial es menor el voltaje es igual al del inicial, a pesar de que k es mayor, esto se debe a que el cambio no es muy grande, por lo tanto se comporta de forma similar. Teniendo en cuenta lo anterior, para la corriente se va a observar un comportamiento similar o igual, así, una salida de corriente con k mayor que la de las condiciones iniciales. Pero para los parámetros por debajo genera valores muy grandes los cuales no se encuentran en la gráfica ya que simulink no los genera adecuadamente.



Gráfica 23 Kema, Variaciones de corriente

Parámetros Kema

Inicialmente se presenta el algoritmo con los valores que se cambiaron, si estos se comparan con los valores presentados en los análisis hechos en las gráficas números 1, 2, 3 y 4.

```

%% Parámetros para el modelo Kema
clc
clear all
x0=1e4;
Lambda1=1.47375;
Lambda2=1.9;
Lambda3=2;
Lambda12=147.375;
Lambda22=190;
Lambda32=200;
Lambda13=0.0147375;
Lambda23=0.019;

```

```
Lambda33=0.02;  
k1=4.9;  
k2=5;  
k3=100;  
k12=490;  
k22=500;  
k32=10000;  
k13=0.049;  
k23=0.05;  
k33=1;  
tao1=2.87694e-6;  
tao2=tao1/k1;  
tao3=tao2/k2;  
A1=0.42369938e-6;  
A2=17.0195e-6;  
A3=A2*k3;  
A12=0.42369938e-4;  
A22=17.0195e-4;  
A32=A2*k3;  
A13=0.42369938e-8;  
A23=17.0195e-8;  
A33=A2*k3;  
int=0.02;
```

7. RESULTADOS COMPARATIVOS

Los principios de Cassie y Mayr constituyen la base de los demás modelos de arco eléctrico que se han venido desarrollando. En comparación con los dos modelos principales el modelo de Cassie provee resultados satisfactorios cuando las corrientes son altas o fuertes, mientras que el modelo de Mayr es preferido cuando las corrientes son preferiblemente débiles. Los modelos han gustado, en el sentido en que toma en consideración la constante de la longitud del arco.

El modelo de KEMA propone una elección adecuada de tiempo, potencia y corriente en el pico de tensión del arco y en la extinción de la conductancia la corriente cero, el cual puede ser ajustado a los valores medidos⁴⁰ al realizar una adecuación del modelo de Shavemaker, la cual permite analizar cuándo se presenta la interrupción, ya que hay una relación de un operador⁴¹. S.M. Hassan y otros⁴² utiliza el principio de la realimentación negativa que comprende un “sistema objetivo” el cual se desea obtener con el fin de corregir las desviaciones naturales del modelo; para ello se ajusta la ganancia con la cual se llegará al “sistema objetivo”.

En lo referente al modelo de Hadebank Este trabajo concluye con la validación del modelo que realiza una comparación de resultados reales con los resultados simulados mediante técnicas digitales.⁴³ Donde se tiene en cuenta que este tipo de comparaciones son importantes para determinar resultados cada vez más fiables, es decir, contrastados.

⁴⁰ L. van der Sluis, W. R. Rutgers; “Comparison of Test Circuits for High-Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations with Arc Models” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 7, No. 4 pp 2037-2045. Octubre 1992.

⁴¹ Traducción propia.

⁴² S. M. Hassan, E. Youhanna, A. R. Edalatian; “The Modeling of Electric Arc in High Voltage Circuit Breakers with Use of Schavemaker Model and Negative Feedback” International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol 2, Issue. 16, pp 19-22. Mayo 2013.

⁴³ Ibidem.

La simulación del modelo mejorado de Habedank⁴⁴ mezclándola con la teoría electromagnética del principio del arco eléctrico, donde se concluye que el modelo de Habedank proporciona mejores resultados cuando se evalúa en condiciones de alta tensión.

Por el contrario este trabajo según los resultados propone que el modelo de Shavemaker mejorado es el que mejores resultados arroja.

⁴⁴ A. Sawicki; "Modified Habedank and TWV Hybrid Models of a Variable Length Arc for Simulating Processes in Electrical Devices" University of Technology - Czestochowa, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa; No.1 de Enero 2012.

8. CONCLUSIONES

Es importante en los modelos de arco eléctrico contar con buenas posibilidades de obtener un indicador para la interrupción, como una característica del circuito que lleve a un mejor rendimiento en los sistemas eléctricos.

No es recomendable aumentar el voltaje y la corriente a niveles muy altos, a pesar de que el tiempo sea menor, como en el modelo de habedank.

Cuando se disminuye la potencia, la respuesta del voltaje de arco se vuelve una onda rectificadora o pulso de modelo de habedank

Cuando la potencia es mayor no afecta mucho el modelo con respecto a los parámetros iniciales, de acuerdo a lo observado en el modelo de habedank

De acuerdo a las observaciones realizadas, y en comparación, se puede expresar que el modelo recomendado para los sistemas eléctricos de potencia es el modelo de shavemaker mejorado, debido a que tiene respuestas en tiempos rápidos, es decir, lapsos de tiempo cortos, y con niveles de voltaje bajos, los cuales protegen los elementos que integran un sistema eléctrico.

Para ganancias menores a uno pero no demasiado cercano a cero, el modelo de shavemaker mejorado, es el mejor modelo que arroja la simulación,

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda acentuar el uso de ayudas tecnológicas y de software tales como Matlab, en programas como los de Ingeniería eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Igualmente se recomienda la importancia del modelado en los diferentes estudios de los interruptores de potencia, ya que esto genera efectos en la red de armónicos producidos por estos interruptores.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Ahmethodzic, M. Kapetanovic, K. Sokolija; "Linking a Physical Arc Model with a Black Box Arc Model and Verification" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 18, No. 4, pp 1029-1037. Agosto 2011.
- A. Ballestero, L. Ghezzi, M. Popov, G. Tribulato. "Black Box Modeling of Low Voltage Circuit Breakers" IEEE Transactions on Power Delivery, Octubre 2010.
- A. Parizad, H.R. Baghaee, A. Tavakoli, S. Jamali; "Optimization of Arc Models Parameters Using Genetic Algorithm" EPECS'09, Electric Power and Energy Conversion Systems, pp 1-7. Noviembre 2009.
- A. Sawicki; "Modified Habedank and TWV Hybrid Models of a Variable Length Arc for Simulating Processes in Electrical Devices" University of Technology - Czestochowa, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa; No.1 de Enero 2012.
- C. D. Ñustez, D. F. Montoya. "Modelado del Arco Eléctrico de un Interruptor de Potencia y su Impacto en un Sistema Eléctrico". Monografía para trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingenierías. Año 2013.
- D. Cubillos, L. Ibañez; "Descripción Teórica y Análisis de Fallas de Arco Mediante un Modelo Adecuado, con el Propósito de Determinar su Efecto en Líneas de Transmisión". Monografía para trabajo de grado. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Año 2008.
- G. A. Cividjian, N. G. Silvis, J. Klejch; "KEMA Arc Model Parameters Evaluation" Optimization of Electrical and Electronic Equipments, pp 215-220. Junio 2004.
- J. L. Guardado, S. G. Maximov, E. Melgoza, J. L. Naredo, P. Moreno; "An Improved Arc Model Before Current Zero Based on the Combined Mayr and Cassie Arc Models" International Journal of Science, Spirituality, Business and Technology, Vol. 1, No.2. pp. 15-21. Febrero 2013

L. C. Pinto, L. C. Zannetta Jr; "Medium Voltage SF6 Circuit Breaker Arc Model Applications" Electric Power Systems Research 53; pp, 67-71; Enero 2000.

L. Van der Sluis, W.R., Rutguers "Comparison of Test Cirucits For High-Voltage Circuit Breakers by Numerical Calculations With Arc Models" IEEE Transcions on Power Delivery. Vol. 7, No. 4 October 1992

N. Gustavsson; "Evaluation and Simulation of Black-Box Arc Models for High Voltage Circuit-Breakers" Automatization and Communication Systems Engineer Thesis / Supervised ABB Group; Marzo 2004.

O. Toshiyuki, I. Masaru, W. Masayoshi, "Current Limiting Simulation for Low Voltage Circuit Breaker" The 29th Annual Coference of the IEEE. Volume: 1, pp. 631-636. Noviembre 2003.

P. Shavemaker, L. van der Sluis; "Quantification of the interrupting performance of high-voltage circuit breakers" Science, Measurement and Technology, IEE Proceeding, Vol 149, Issue 4, pp 153-157. Noviembre 2002.

RIVERA G., José F.; VALLEJO B., Carlos E. "Estudios de Cálculo del Arco Eléctrico en Sistemas Industriales y Propuestas Para Reducir el Riesgo – Desarrollo de Aplicativos computacionales-" U.P.B. Medellín 2013.

Saavedra Rubio G, Dávila Marisol. "Modelado del interruptor de potencia" Monografía para trabajo de grado Universidad de los Andes de Mérida. Noviembre 2008.

S. M. Hassan, E. Youhanna, A. R. Edalatian; "The Modeling of Electric Arc in High Voltage Circuit Breakers with Use of Shavemaker Model and Negative Feedback" International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol 2, Issue. 16, pp 19-22. Mayo 2013.

U. Hadebank. "Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short-circuit Breaking Test". Berlin, 1993 IEEE Vol. 8 No. 4 pp.1921-1925

V. Rashtchi, A. Lotfi, A. Mousavi; "Identification of KEMA Arc Model Parameters in High Voltage Circuit Breaker by Using of Genetic Algorithm" IEEE International Conference on Power and Energy PEC'08, pp 1515-1517. Diciembre 2008.

W. Xi-Xiu, L. Zhen-Biao, T. Yun, M. Wenjun, X. Xun; "Investigate on the Simulation of Black-Box Arc Model" 1st International Conference on Electric Power Equipment IEEE pp. 629-636 Junio 2011.

Walter F, Giménez. "La simulación del arco eléctrico". Ediciones UNL Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
http://books.google.com.co/books?id=zDsgc_glzyMC&pg=PA17&hl=es&source=gb_s_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false

W. F. Giménez, "Modelización de interruptores eléctricos de potencia". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya Universidad Nacional del Litoral Santa Fe, Argentina, Junio 2000.

W. Xi-Xiu, L. Zhen-Biao, T. Yun, M. Wenjun, X. Xun; "Investigate on the Simulation of Black-Box Arc Model" 1st International Conference on Electric Power Equipment IEEE pp. 629-636 Junio 2011.

Z. Abderahmane, H. Moulai; "Application of Artificial Neural Networks for Electric Arc Extinction Modeling in High Voltage Circuit Breakers" MELECON 2010, 15TH Mediterranean Electrotechnical Conference; pp. 248-252. Abril 2010.