

Optimización Topológica en un relevador de un polo doble tiro, para la disminución de costos de fabricación, haciendo uso de simulación numérica

Mario Ibañez Olvera
División Ing. Mecatrónica
*Tecnológico de Estudios Superiores de
Tianguistenco*
Santiago Tianguistenco, México
mario_mecatronica@test.edu.mx

Adriana Yañez Lendizabal
División Contaduría
*Tecnológico de Estudios Superiores de
Tianguistenco*
Santiago Tianguistenco, México
adriana_yl@test.edu.mx

Jaramillo Sierra Bethsabet
División Ing. Ambiental
*Tecnológico de Estudios Superiores de
Tianguistenco*
Santiago Tianguistenco, México
bethsabet.jaramillo@test.edu.mx

Alma Neli Hernández Arias
División Ing. Ambiental
*Tecnológico de Estudios Superiores de
Tianguistenco*
Santiago Tianguistenco, México
almaneli.hernandez@test.edu.mx

Jesús Guerrero Callejo
División Contaduría
*Tecnológico de Estudios Superiores de
Tianguistenco*
Santiago Tianguistenco, México
jesus_201822052@test.edu.mx

Resumen— *En este trabajo se muestra la optimización topológica de un relevador de un polo doble tiro, con el fin de optimizar los recursos de fabricación del dispositivo.*

Para desarrollar este trabajo se realizaron dos simulaciones; en la primera se simuló en relevador original sin ninguna modificación en la estructura.

En una segunda simulación se realiza modificando la estructura de las placas, con la intención de disminuir material (cobre), y por ende los costos de fabricación; sin modificar el correcto funcionamiento del dispositivo optimizado.

Para ambas simulaciones se consideraron todas las variables que involucran al sistema. Variables como los tipos de materiales que forman el relevador, la corriente máxima de excitación que soporta el dispositivo, las medidas exactas del relevador, la estructura del relevador. Con esto se garantiza que lo simulado respecto a lo real tienen mucha similitud, que los resultados obtenidos serán muy similares a los resultados reales.

Este tipo de técnica para la optimización topológica y reducción de costos de fabricación; es una técnica que se utiliza en la denominada industria 4.0 (I4.0), donde lo importante de la optimización topológica es la de reducción de materia prima de los productos sin alterar su funcionamiento, y con esto generar una mejor ganancia y eficiencia en los productos fabricados.

La simulación numérica se realizó con un software que utiliza el método de elemento finito. El software utilizado Ansys Electronics; usando la parte de bajas frecuencias, en específico la librería Ansys Maxwell.

Palabras clave— *Simulación numérica, relevador, optimización topológica, e industria 4.0.*

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la industria no importando el tipo de giro, se desarrollan infinidad de prototipos para los nuevos diseños de los productos. Estos nuevos productos en su mayoría basados de los productos ya existentes, con la seguridad del funcionamiento gracias a la experiencia que tienen en la fabricación de estos. Provoca que en muchas ocasiones ya no consideren la optimización topológica de los productos ya existentes. Esto por la falta de herramientas o de tiempo para

poder modificar físicamente los dispositivos, además de los costos elevados por el tiempo invertido que requeriría este tipo de investigaciones. Por lo que una alternativa es utilizar la simulación numérica, no solo para optimizar topológicamente los productos en forma virtual, sino también para validar, comprobar el funcionamiento de los productos ya existentes, prediciendo fenómenos no considerados, y así mejorar los productos ya existentes.

La simulación numérica es parte fundamental de la I4.0, ya que como se sabe tiene muchos beneficios en la parte del desarrollo de nuevos productos, validación de productos y mejora de los productos ya existentes. Desarrollar nuevos productos virtualmente y mejorarlos nos ayuda a disminuir los riesgos que normalmente conllevan los nuevos desarrollos. Técnicas como la optimización topológica para la disminución de material, el diseño de gemelos digitales para virtualización real de sistemas, etc. Son técnicas que el día de hoy son tecnologías que se está aplicando en la I4.0.

II. EXPERIMENTACIÓN

El desarrollo de la simulación numérica para la optimización topológica del relevador, como ya se había mencionado consta de dos etapas. La primera es la creación de la geometría, el diseño asistido por computadora (CAD) sin optimización el relevador original, la segunda etapa la optimización topológica aplicada en las placas del relevador.

A. Geometría del relevador sin optimización topológica

El desarrollo de la geometría del relevador se diseñó a partir del diseño real del dispositivo, tal y como se muestra en figura 1.

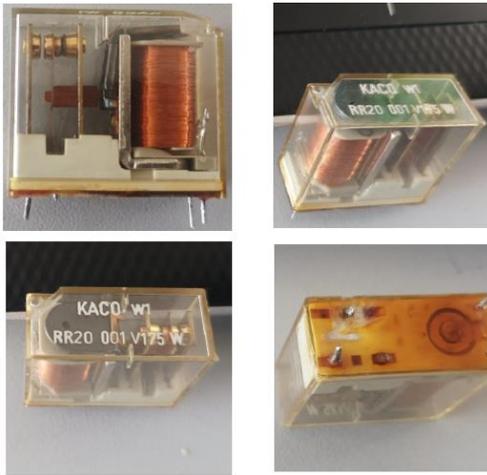


Figura 1. Imágenes del relevador donde se obtuvo el CAD.

Para el CAD del relevador de un polo doble tiro, se consideraron todas las características físicas, por muy mínimas que fueran, con la finalidad de acercar más lo virtual con lo real. El diseño obtenido del CAD a partir del relevador real se muestra en figura 2.

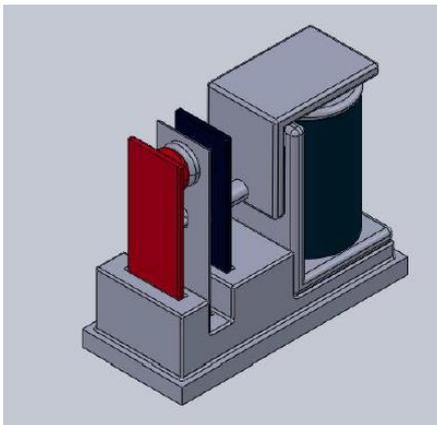


Figura 2 CAD del relevador de un polo doble tiro.

Con el CAD obtenido se realizará la primera simulación numérica del relevador. Como ya se había mencionado la intención es de corroborar el correcto funcionamiento del relevador simulado, respecto al funcionamiento real [1]. En la figura 3, se muestra las partes y los nombres de las partes que componen al relevador.

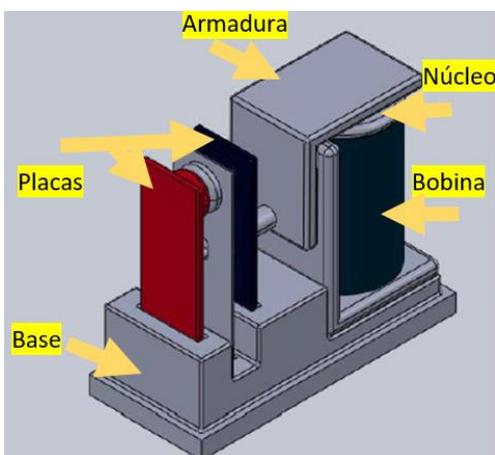


Figura 3 Partes del relevador

B. Simulación multifísica del relevador de un polo doble tiro

La simulación numérica se realizó en dos físicas, electromagnética y mecánica estructural; La simulación electromagnética se realizó para conocer el comportamiento del campo magnético, así como las fuerzas que ejerce el campo magnético con las placas, para la activación del relevador en la parte mecánica. Para la simulación electromagnética se usó el software Ansys Maxwell, que en un primer instante se caracterizó los materiales utilizados en el relevador, tal y como se muestran en la tabla 1. La figura 4 muestra la lista cargada en el software de los materiales colocados en el CAD.

Tabla 1. Lista de materiales utilizados en la simulación

Descripción de la pieza	Material
Núcleo	Acero 1010
Armadura	Acero 1010
Placas	Cobre
Bobina	Cobre
Base	Polietileno

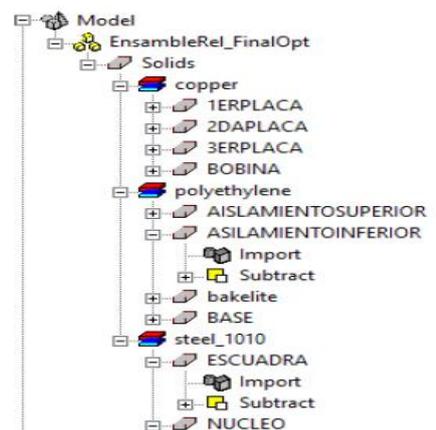


Figura 4. Lista de materiales

Una vez teniendo caracterizado el CAD con los materiales correspondientes, toca el turno de colocar la excitación a la bobina, esto corresponde a colocar la corriente que circulara por la bobina para la generación del campo magnético, que este a su vez causa una atracción magnética generando el movimiento mecánico para la activación del levador.

Para colocar la excitación [2] en la bobina se realiza un corte, en la geometría de la bobina, tal y como se muestra en la figura 5.

Colocación de la corriente en el corte de la bobina

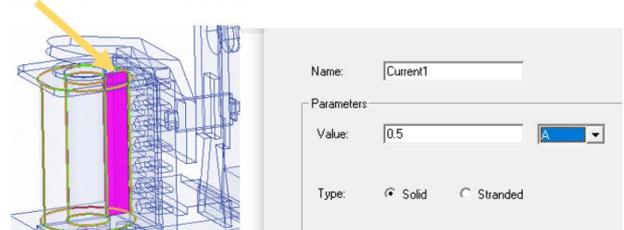


Figura 5. Colocación de la corriente

El valor de la corriente de excitación corresponde a .5 amperes, este es el valor estándar de operación para activación del relevador.

Para el cálculo de la fuerza que se genera en la armadura, correspondiente a la atracción genera debido al campo magnético, se realiza una parametrización, donde esta parametrización corresponde al calculo que realizara el software para la obtención del valor de la fuerza en la armadura[3], tal como se muestra en la figura 6.

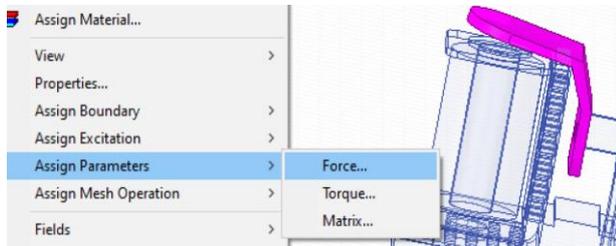


Figura 6. Parametrización para el cálculo de la fuerza

Por último, se realiza la configuración del análisis. Para este análisis se utilizo un análisis magnetostático. Este análisis corresponde a un voltaje de entrada continuo, con un valor de .5 amperes. No es necesario realizar un análisis transitorio, ya que para el uso de este dispositivo no contiene una señal alterna variante en el tiempo para que el dispositivo funcione en una forma normal.

C. Simulación numérica en la física mecánica estructural

La simulación numérica de la física mecánica estructural, se hizo uso del valor de la fuerza obtenido de la simulación electromagnética, que más adelante se mostraran los resultados de los diferentes valores obtenidos.

En la simulación mecánica estructural se colocó la fuerza en la armadura, para poder ver el efecto de deflexión de las placas por la transmisión del movimiento mecánico [6], de la armadura hacia las placas como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Colocación de la fuerza en el análisis mecánico estructural

Como se ve en la figura 6, las placas están en un estado normal, sin ninguna fuerza. Posteriormente realizando el análisis mecánico estructural con la fuerza aplicada, se puede ver que hay una deflexión de la placa originada por la fuerza

que se ejerció en la armadura tal y como se muestra en la figura 8.

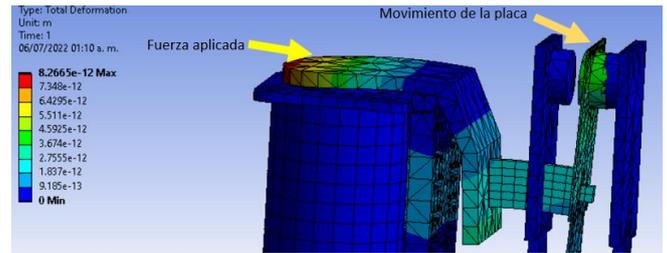


Figura 8. Movimiento de la placa por el efecto de la fuerza en la armadura.

Con esta última simulación numérica realizada en la parte mecánica estructural se estaría corroborando el funcionamiento correcto del relevador en la simulación, ya que es el funcionamiento que en la realidad se estaría esperando [4].

D. Geometría del relevador con optimización topológica

Para la optimización topológica en el relevador, se realizaron unos cortes en las placas de cobre, tal como se muestran en la figura 9.



Figura 9. Pieza con optimización topológica

Como se puede ver en la figura 9, se propone una disminución de material en las placas del relevador; esta propuesta de optimización al igual se puede realizar en la disminución de cobre en la bobina, o en el acero de la armadura. Para ejemplo solo se analizará esta optimización en las placas para corroborar si se realizó una correcta selección del material a optimizar [6].

III. RESULTADOS

Los resultados se mostrarán en tres partes. En la primera parte se obtendrán la visualización de las comparativas de la densidad de campo magnético (B), tanto en el relevador sin aplicar la optimización topológica, como en el relevador aplicando la optimización topológica, esto para corroborar que el sistema tenga una coherencia en el funcionamiento. En la segunda parte se mostrarán los resultados y comparativa del análisis mecánico estructural del relevador con y sin optimización topológica, misma que definirá si la propuesta de la optimización topológica del relevador en las placas es correcta o incorrecta, y en la tercera y última parte se realizara un estudio de determinación y ahorro de los costos de producción que se puede realizar con la optimización topológica propuesta en este trabajo.

A. Visualización de la densidad del campo magnético

En la figura 10 se muestra la comparativa de los dos resultados obtenidos en el análisis electromagnético. Aun que

era lógico la respuesta obtenida en el resultado de la densidad del campo magnético, donde no se esperaba ningún tipo de variación en la densidad del campo magnético. Esto debido a que no se modificó nada en la bobina. Este cálculo se realizó para estar seguros, que no hubiera algún fenómeno no deseado que pudiera afectar el comportamiento del relevador.

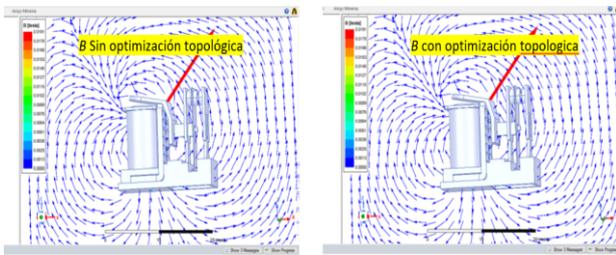


Figura 10. Resultados de la densidad del campo magnético en forma vectorial

Efectivamente como se había esperado, no hay un resultado diferente de la densidad del campo magnético en forma vectorial en el relevador, tanto en su forma original como con la forma optimizada, por lo que al menos en este análisis de la física electromagnética se ha demostrado que la optimización topológica, por el momento no ha afectado el funcionamiento del mismo.

El resultado de la parametrización para el cálculo de la fuerza, se obtuvieron resultados muy similares. Donde estos resultados fueron utilizados en el análisis mecánico estructural para corroborar el funcionamiento de la deflexión en el relevador causado por la atracción magnética, en la tabla 2 se muestra los resultados obtenidos en la simulación electromagnética de la fuerza que genera el campo magnético sobre la armadura, que es la fuerza que genera el movimiento mecánico.

Tabla 2. Resultado de la parametrización para la obtención del resultado de fuerza

Análisis	F(x)	F(y)	F(z)	Mag(F)
Relevador original	-4.4861E-07	-3.3633E-09	-2.4474E-06	2.4883E-06
Relevador optimizado	-4.4862E-07	-3.3635E-09	-2.4476E-06	2.4882E-06

B. Visualización del análisis mecánico estructural del relevador

La fuerza colocada en la simulación del análisis estructural del relevador tanto original como optimizado fue el que se obtuvo de sus respectivas simulaciones electromagnéticas. En la figura 11 se muestra la comparativa de las simulaciones en la física mecánica estructural

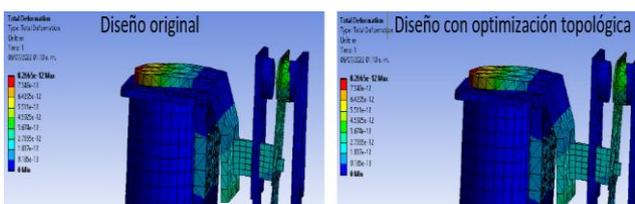


Figura 11. Comparación de resultados en la física mecánica estructural

Como se puede observar en la figura 11, prácticamente tenemos el mismo valor de deformación, por lo que no hubo algún tipo de modificación en lo funcional del dispositivo.

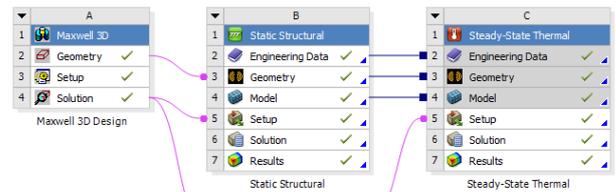


Figura 12. Multifísica para la valoración térmica, estructural

En la figura 12 se muestra el análisis multifísico para la valoración térmica, estructural. Todo esto a partir de las corrientes que se colocan en el sistema del análisis electromagnético, considerando la optimización en las placas.

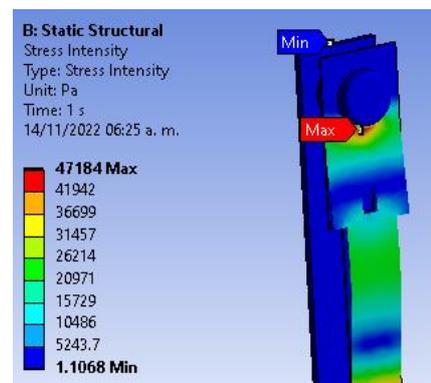


Figura 13 Análisis de Stress Intensity

En la figura 13 se muestra el análisis de uso del relevador, corroborando el tiempo de funcionamiento.

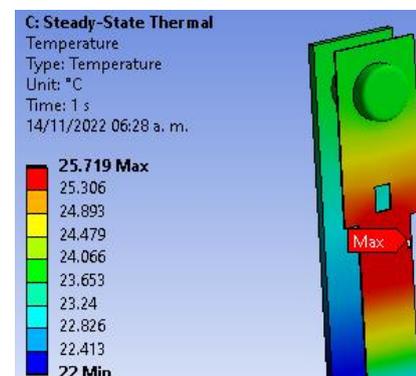


Figura 14. Análisis térmico

Por último, en la figura 14 se muestra el análisis térmico, donde prácticamente no hay ni una modificación que afecte al dispositivo por efecto del calentamiento.

C. Determinación de costos de producción sin optimización topológica

Tomando en cuenta la cantidad de material necesaria para la fabricación de cada relevador; obtenida por medio de la física del análisis mecánica estructural, se hizo una cotización de los precios de los materiales, y se determinó los más convenientes; los que sirvieron como base para determinar el costo de las placas del producto.

Tabla 3. Materia prima utilizada en el proceso para fabricación del relevador original

Materia prima a utilizar en el relevador original		
Materiales	Unidad de medida	Cantidad requerida
Cobre	Gramos	7.811
Acero	Gramos	6.11
Polietileno	Gramos	2.68

Se destacan los costos por materia prima requerida para la fabricación de las placas del relevador, haciendo uso del proceso de manufactura actual.

Tabla 4. Costo por la fabricación de las placas del relevador por el proceso de manufactura actual

C1. Determinación de costos de producción con optimización topológica

A través del proceso de manufactura optimizada permitió disminuir la materia prima, reduciendo los costos de fabricación, sin afectar la funcionalidad y eficacia del relevador. A continuación, se muestra en la tabla 5 la disminución de materia prima y costos de producción. En esta tabla se presenta la reducción de materia prima utilizada para la fabricación de las placas del relevador, haciendo uso del proceso de manufactura optimizado.

Tabla 5. Materia prima utilizada en el proceso para fabricación del relevador original.

Materia prima a utilizar en el relevador original		
Materiales	Unidad de medida	Cantidad requerida
Cobre	Gramos	7.52
Acero	Gramos	5.95
Polietileno	Gramos	2.68

Aplicando el método de manufactura optimizada, se presenta el ahorro en un 3% en los costos por la materia prima para la elaboración de las placas del relevador como se muestra en la tabla 6.

Tabla 4. Costo por la fabricación de las placas del relevador por el proceso de manufactura optimizado

Costos por pieza del relevador original			
Materiales	Cantidad requerida (gramos)	Precio por gramo	Costo unitario
Cobre	7.52	\$0.25	\$1.95
Acero	5.95	\$0.05	\$0.27
Polietileno	2.68	\$0.10	\$0.27
Total	16.15		\$2.42

IV. CONCLUSIONES

Como conclusiones podemos comentar, que la técnica utilizada en este trabajo para realizar la optimización topológica en un relevador de doble tiro es funcional, esto validado por las diferentes simulaciones numéricas utilizadas en este trabajo, y el estudio de costos de fabricación del producto. Para la parte de la simulación electromagnética se

consideraron la mayoría de variables que involucraron al sistema. Por ejemplo, las características del material del núcleo que se introdujeron al software incluyendo la gráfica B-H; esto fue primordial para poder obtener este resultado. Al igual se consideraron todas las propiedades de cobre, propiedades como la permeabilidad relativa, conductividad eléctrica, la densidad de masa, el módulo de Young, por mencionar algunas. Definitivamente en una simulación numérica si no se cuenta con esta información difícilmente se podrá obtener un resultado preciso como en este caso. Una ventaja de utilizar este software Ansys, en específico Ansys Maxwell, fue que el software contiene una amplia librería de materiales utilizados para el desarrollo de relevadores. Esto a su vez permitió complementar la información necesaria para caracterización de los materiales en la simulación numérica de

Costos por pieza del relevador original			
Materiales	Cantidad requerida (gramos)	Precio por gramo	Costo unitario
Cobre	7.811	\$0.25	\$1.95
Acero	6.11	\$0.05	\$0.27
Polietileno	2.68	\$0.10	\$0.27
Total	16.601		\$2.50

este relevador de doble tiro. Otro factor importante que facilito la simulación, fue la técnica que utiliza el software para la discretización del sistema (en mallado), la técnica que utiliza el software para el en mallado del CAD, es la malla adaptativa. Este tipo de técnica de malla adaptativa facilita el trabajo de la generación de la malla, esto gracias a que el software contiene internamente algoritmos genéticos cuya función es la de adaptar la mejor malla al sistema, considerando como puntos importantes las excitaciones colocadas en el CAD. Por la parte del análisis de la física mecánica estructural, se trabajó con diferentes mallas, esto con el fin de saber cuál es la malla que mejor se adapta a la estructura del CAD del relevador, quedando la malla tipo hexaedro con un número de 16000 elementos discretizados en el CAD. Para el tipo de contacto seleccionado, se realizaron pruebas para saber cuál es la mejor selección que se adapta a la simulación del relevador. Los contactos con los que se experimentaron en el CAD, fueron los de tipo nodo a nodo, superficie a superficie, y nodo superficie. El que mejor se adaptó a la simulación de nuestro CAD, fue el análisis de contacto superficie a superficie, esto debido a la flexibilidad de la autodeterminación de los contactos entre las placas, que esto sin duda facilita la simulación.

Este tipo de trabajo demuestra que la simulación numérica tiene mucha aplicación en la industria, y que puede servir para validar los resultados de los nuevos diseños u optimizar los productos ya existentes, sin duda alguna en este trabajo permitió dar un soporte analítico al relevador de un tiro dos polos, esta información puede complementar los datos de usuario del fabricante, para validar el correcto funcionamiento del dispositivo. Las empresas están implementando la simulación numérica como parte de sus procesos para el desarrollo de nuevos productos y optimización topológica de los productos que actualmente tienen ya desarrollados, por lo que en esa empresa se puede decir, que están ya implementando uno de los pilares de la industria 4.0 que es la simulación numérica. Poco a poco la industria mexicana tendrá que adoptar estas tecnologías como apoyo para el desarrollo y mejora de sus productos que fabrican. Por último

es importante mencionar que ya se tienen pruebas físicas del este diseño, solo que desafortunadamente no es posible mostrar las imágenes por cuestiones de confidencialidad.

V. REFERENCIAS

[1] IEEE Standard C37.112–1996. IEEE Standard Inverse–time Characteristic Equations for Overcurrent Relays.

[2] IEC Standard 255–4, *Single Input Energizing Measuring Relays with Dependent Specified Time*. IEC Publication 255–4. First Edition. 1976.

[3] Alstom Grid, "Network protection & automation guide," Alstom Grid, 2011.

[4] Protecciones de sistemas eléctricos, UFRO.

[5] E. O. Schweitzer y D. Hou, «Filtering for protective relays,» Atlanta, Georgia, 1993.

[6] Conde A., Vázquez E., Altuve H.J. Time Overcurrent Adaptive Relay. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 25(10):841–847. 2003.