



VICERRECTORIA DE INVESTIGACIONES  
División de Proyectos

**FORMATO PARA LA ELABORACIÓN  
DE INFORMES FINALES - PROYECTOS  
DE INVESTIGACIÓN**

**OBTENCIÓN EN CAMPO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN  
TRANSFORMADOR DE POTENCIA ENERGIZADO**

**Proyecto No. 2795**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ALTA TENSIÓN (GRALTA)  
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**RESUMEN DEL PROYECTO**



**Santiago de Cali, 14 de Diciembre de 2015**



Fecha de presentación del Informe: Día  Mes  Año

### Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: <b>2795</b>			
Título del proyecto: <b>Obtención en campo de la respuesta en frecuencia de un transformador de potencia energizado.</b>			
Facultad o Instituto Académico: <b>Facultad de ingenierías</b>			
Departamento o Escuela: <b>Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica</b>			
Grupo (s) de investigación: <b>Grupo de Investigación en Alta Tensión - GRALTA</b>			
Investigadores <sup>1</sup>	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Guillermo Aponte Mayor	10 h/s	10 h/s
Coinvestigador 1	Eduardo Gómez Luna	10 h/s	10 h/s
Coinvestigador 2	Héctor Cadavid Ramírez	3 h/s	3 h/s
Asesor Externo	Jorge Pleite Guerra	3 h/s	3 h/s

### 1. Resumen ejecutivo:

En el proyecto de investigación realizado se llevó a cabo la ejecución de la prueba de respuesta en frecuencia en un transformador de potencia energizado, de una subestación del sistema eléctrico.

El proyecto consistió en llevar un prototipo de laboratorio de IFRA on-line (baja tensión, hasta 1kV) a un equipo IFRA on-line de alta tensión (hasta 15kV), para lo cual la empresa del sector Eléctrico EMCALI permitió realizar pruebas en un transformador Móvil de 34.5/13.2 kV-28MVA, ubicado en la Subestación Sur del sistema eléctrico de Cali.

Para el proyecto, GRALTA aportó el método desarrollado en laboratorio y los equipos principales para llevar a cabo la prueba FRA on-line; la Universidad del Valle el presupuesto para llevar montar el prototipo funcional a campo y la empresa EMCALI el espacio y el transformador donde se realizaron todas las pruebas.

<sup>1</sup> Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

### **1.1 Los objetivos planteados en el proyecto:**

#### Objetivo general:

El objetivo general del proyecto fue el de obtener la respuesta en frecuencia de un transformador 13.2/34.5 kV estando en servicio (FRA on-line), sin afectar su condición de operación y el desempeño del sistema eléctrico.

#### Objetivos específicos:

Aplicar en un transformador piloto de una subestación de EMCALI 13.2/34.5 kV, una metodología desarrollada en Gralta y probada en laboratorio, para obtener la respuesta en frecuencia de un transformador on-line.

Verificar la consistencia y repetitividad del método al obtener la respuesta en frecuencia de un transformador on-line, bajo diferentes condiciones de trabajo y de carga.

Analizar los resultados obtenidos para validar la aplicación en campo del método y definir la posibilidad de su aplicación de forma generalizada en transformadores de potencia.

### **1.2 Resultados obtenidos en el proyecto:**

#### Relacionados con la generación de conocimiento y/o nuevos desarrollos tecnológicos:

Se aplicó en campo una metodología experimental para la obtención de la Respuesta en Frecuencia por impulso (IFRA) en transformadores de potencia energizados, no desarrollada hasta el momento en nuestro país.

Se obtuvieron las curvas de IFRA bajo diferentes configuraciones de conexión y condiciones de carga, verificando que el método si puede ser aplicado en campo con el transformador energizado.

Los resultados obtenidos permiten ver una potencial aplicación del método, para monitoreo de la condición del transformador.

#### Conducentes al fortalecimiento de la capacidad científica nacional:

Se contó con la participación de tres estudiantes de pregrado, al igual que un ingeniero que se vinculó a la Maestría. También se tuvo la participación como asesor internacional del Dr. Jorge Pleite Guerra, profesor de la Universidad Carlos III de Madrid, España.

#### Dirigidos a la apropiación social del conocimiento:



Con los resultados del proyecto se publicó un artículo en una revista nacional, otro artículo se envió a una revista internacional estando en proceso de evaluación, se realizaron tres ponencias una nacional y dos internacionales, difundiendo el método IFRA on-line desarrollado, el cual puede ser de gran utilidad para el sector eléctrico y de interés para la comunidad científica.

## **2. Síntesis del proyecto:**

El análisis de la respuesta en frecuencia permite evaluar el estado de los parámetros internos del transformador, los cuales sólo cambian si se presenta algún tipo de anomalía, deformación o desplazamiento en sus bobinas o en el núcleo. La onda referencia tomada al momento de instalar el equipo, se compara con otras obtenidas posteriormente para identificar la ocurrencia de cambios, esta prueba es no destructiva y no invasiva.

Para llevar a cabo la prueba FRA on-line en transformadores en campo se procedió aplicar un procedimiento validado en laboratorio, mediante el uso de señales controladas, estas señales fueron inyectadas y registradas para luego ser procesadas mediante algoritmos matemáticos, con el objeto de obtener la respuesta en frecuencia estando el transformador en servicio.

En Colombia, el Grupo GRALTA de la Universidad del Valle, Cali-Colombia, ha venido trabajando en el tema de FRA con el transformador en servicio y a partir de los buenos resultados obtenidos a nivel de laboratorio, se planteó el presente proyecto con el objetivo de obtener la respuesta en frecuencia on-line en un transformador de potencia instalado en una subestación del sistema eléctrico.

La empresa del sector Eléctrico EMCALI permitió realizar pruebas en un transformador Móvil de 34.5/13.2 kV-28MVA, ubicado en la Subestación Sur del sistema eléctrico de Cali, lográndose avanzar con la prueba IFRA on-line para su realización hasta un nivel de 15kV y abriendo perspectivas para su futura aplicación en niveles más altos de tensión (115kV y 230 kV).

## **3. Actividades realizadas en el proyecto:**

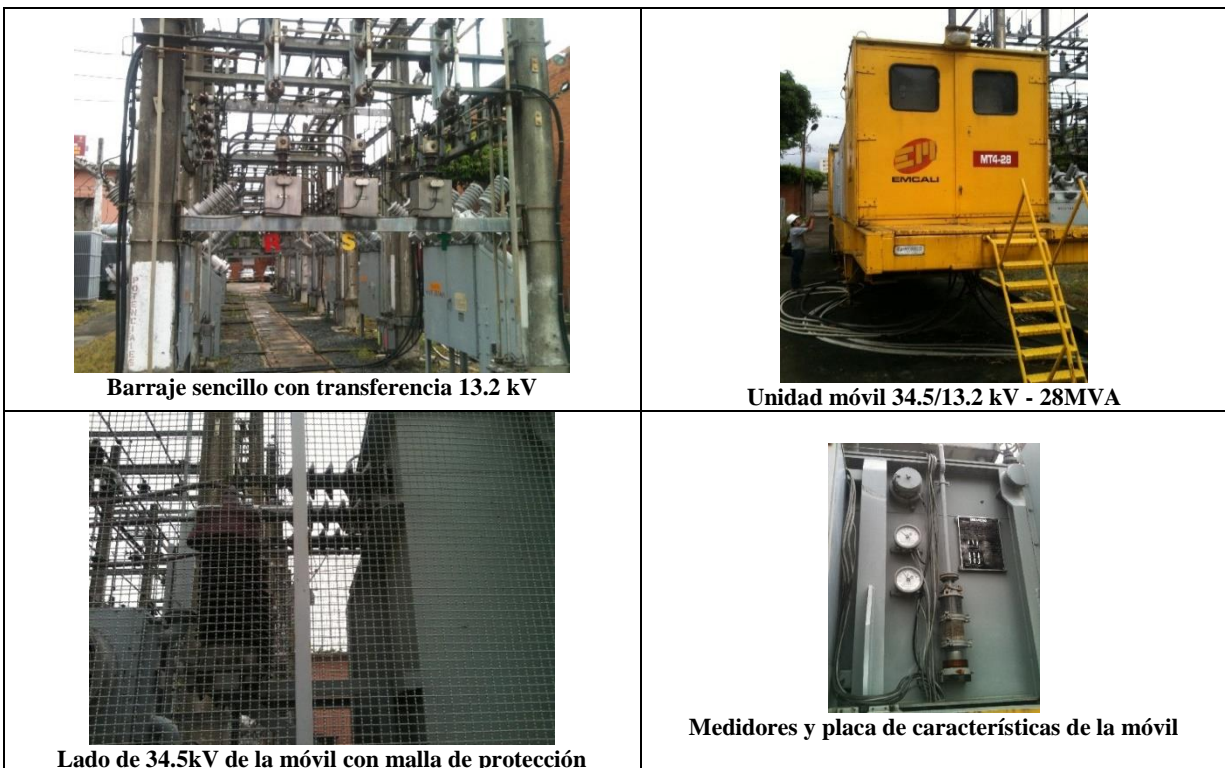
Para llevar a cabo las pruebas on-line se rediseñó el equipo de inyección de pulsos controlados que se había utilizado en laboratorio, ya que éste se encontraba limitado a un nivel de tensión de 1kV.

Para la operación en campo en el sistema 34.5/13.2 kV, se modificó el sistema de inyección de baja tensión. El rediseño realizado consistió en mejorar el aislamiento de los equipos que iban a estar expuestos a un nivel de tensión superior a 1kV, tal como el transformador de ferrita y los capacitores de alta tensión, esto con el fin de no poner en peligro al personal de maniobra y los

equipos. El procedimiento y el software para el método IFRA on-line no se cambió, haciéndose uso de los trabajos realizados previamente en laboratorio.

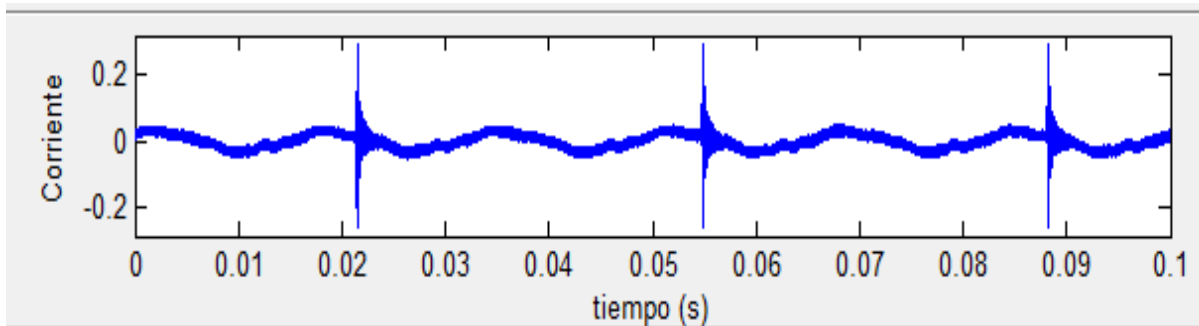
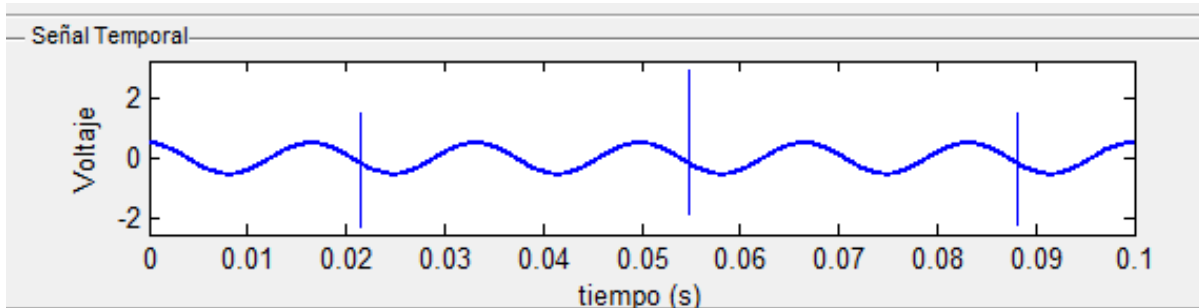
Las pruebas de campo se realizaron sobre un transformador de 28MVA con relación 34,5/13,2kV que hace parte de una unidad móvil, instalada en la Subestación Sur de la empresa EMCALI. La unidad móvil, cuenta, con interruptores en SF6 por el lado de alta y baja tensión, con protección 50/51(sobre corriente) y 86 (diferencial), pararrayos y dos intercambiadores de calor para refrigerar el aceite dieléctrico del transformador.

La cama baja de la unidad móvil tiene una capacidad de 40 toneladas y las conexiones de tensión ya están establecidas con dos cables de 500 MCM (Mil Circular Mil) por cada fase. Por lo general la unidad móvil se encuentra des-energizada y es utilizada en condiciones de emergencia o de mantenimiento, razón por la que se consideró por parte de EMCALI que era el punto más adecuado para las pruebas. La Subestación Sur de EMCALI EICE ESP tiene una configuración de barraje sencillo con transferencia tanto en 34.5 kV como en 13,2 kV y fue en la cual se aplicó la metodología desarrollada.

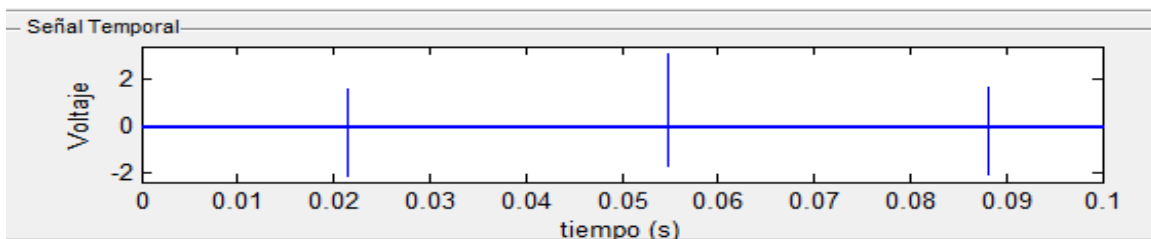


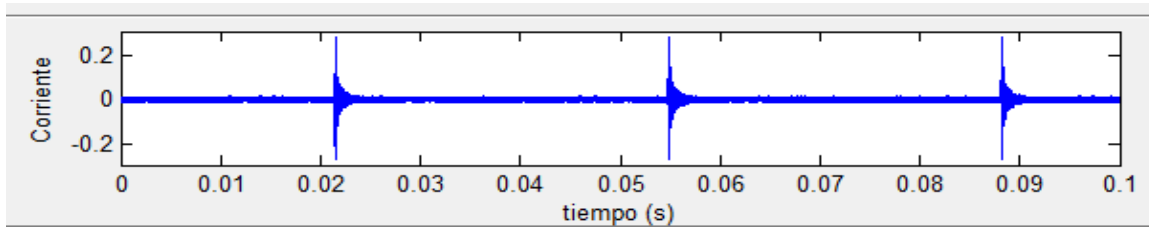
Para verificar la consistencia y repetitividad del método al obtener la respuesta en frecuencia de un transformador on-line, se realizó la prueba bajo diferentes condiciones de trabajo y de carga, energizando la móvil por el lado de alta tensión (34.5 K V), con el transformador en el Tap 4 y se efectuando la medición por el lado de baja tensión.

En las siguientes graficas se presentan las curvas de voltaje y corriente obtenidas en el dominio del tiempo, para el transformador energizado por el lado de alta tensión, se observa la señal de voltaje de 60 Hz y los pulsos inyectados para la realización de la prueba IFRA on-line. Para medir la repetitividad fue necesario enviar varios pulsos en una misma onda; los gráficos corresponden a la onda de corriente y voltaje.



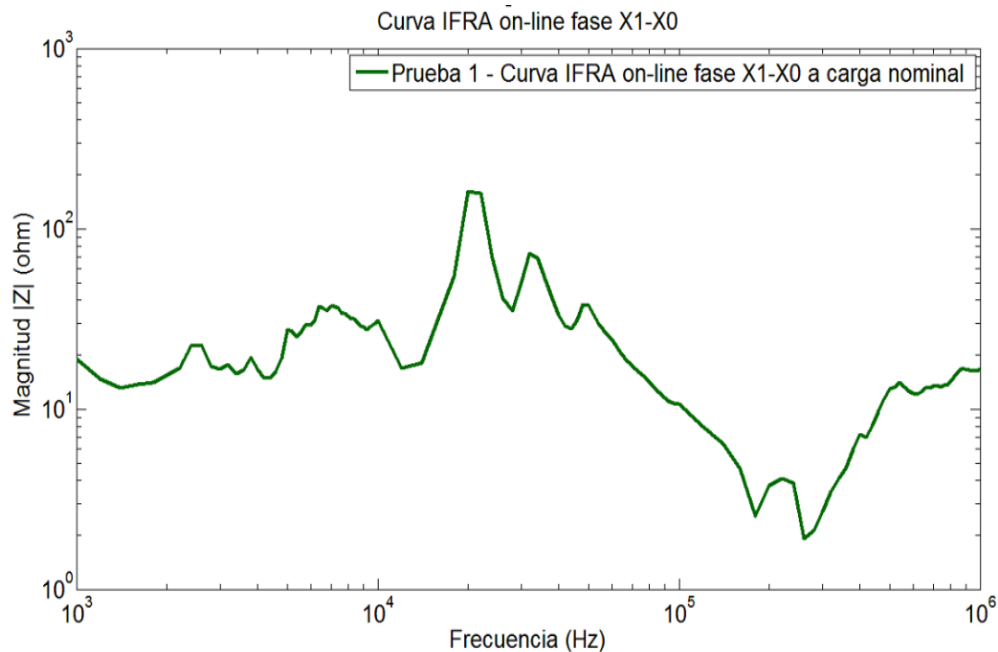
Una vez registradas las señales en el dominio del tiempo, se realizó un filtrado de las ondas de voltaje y corriente, mediante el uso de la transformada wavelet, los resultados obtenidos después del proceso de filtrado se presentan a continuación.



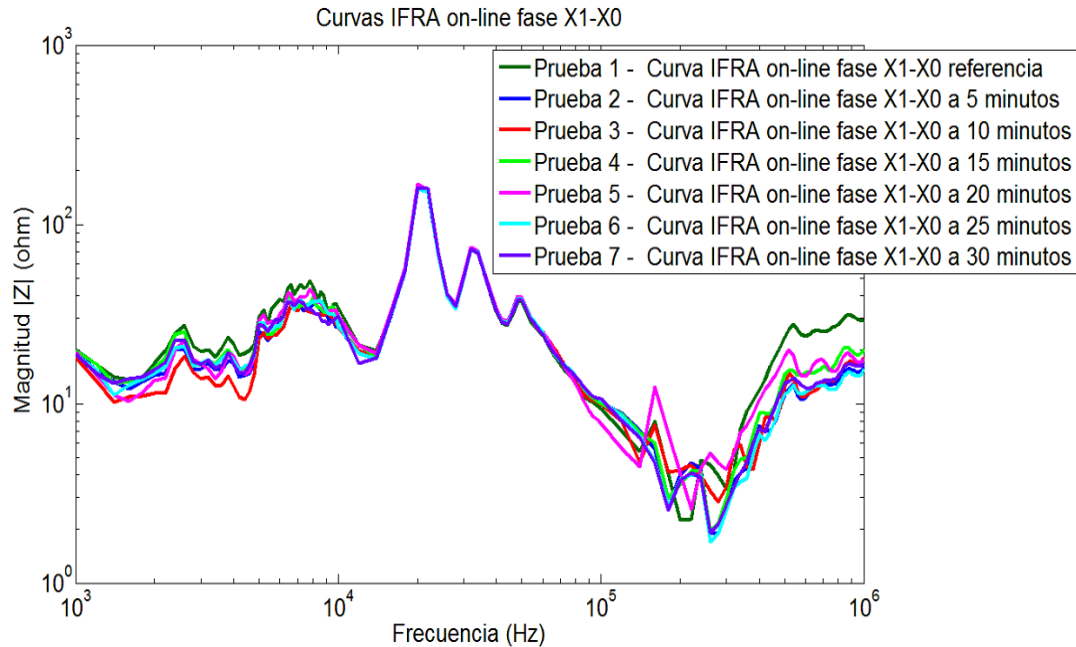


Una vez realizado el filtrado de las señales de voltaje y corriente, se obtuvo mediante procesos matemáticos las curvas de FRA del transformador en servicio.

Se realizó la prueba IFRA on-line con el transformador energizado y a plena carga, midiendo el voltaje de línea y la corriente por neutro, para la fase X1-X0, al momento de la prueba se tenía una corriente por cada fase de aproximadamente 700 Amperios y un voltaje de fase neutro de 7860 Volt. La curva de FRA obtenida se muestra a continuación.



Con el objetivo de verificar la repetitividad de la prueba se realizaron siete pruebas con intervalos de 5 minutos, los resultados se muestran en a continuación.



Para validar la aplicación en campo del método y definir la posibilidad de su aplicación en transformadores de potencia, se hizo un análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados obtenidos, el cual se resume en las siguientes tablas.

PARÁMETRO ANALIZADO	CURVAS IFRA OFF-LINE/ON-LINE
Buena atenuación al ruido	Todas las curvas
Reducidas resonancias provenientes del procesamiento de señal	Todas las curvas
El rango de la repetitividad de las curvas se encuentra entre (10kHz-1MHz)	Todas las curvas



<b>PARÁMETRO ANALIZADO</b>	<b>PORCENTAJE DE ERROR</b>	<b>CURVAS IFRA ON-LINE</b>
Repetitividad: Error relativo Medio (ERM) entre las respuestas obtenidas on-line	Curva Referencia	Figura 42 Prueba 1
	12.10%	Figura 42 Prueba 2
	10.10%	Figura 42 Prueba 3
	9.77%	Figura 42 Prueba 4
	9.91%	Figura 42 Prueba 5
	10.12%	Figura 42 Prueba 6
	11.84%	Figura 42 Prueba 7
	Curva Referencia	Figura 42 Prueba 1
	5.80%	Figura 44 Prueba 2
	6.19%	Figura 44 Prueba 3
	8.35%	Figura 44 Prueba 4
	4.93%	Figura 44 Prueba 5
	6.21%	Figura 44 Prueba 6
	5.44%	Figura 44 Prueba 7
	8.27%	Figura 44 Prueba 8
	6.33%	Figura 44 Prueba 9
	7.27%	Figura 44 Prueba 10
	5.32%	Figura 44 Prueba 11
	4.21%	Figura 44 Prueba 12
	3.28%	Figura 44 Prueba 13
6.27%	Figura 44 Prueba 14	
5.43%	Figura 44 Prueba 15	

De acuerdo con los resultados cuantitativos obtenidos en las tablas anteriores se puede observar como el error relativo medio entre las curvas obtenidas es menor del 15%, lo que da una buena confiabilidad en los resultados y muestra que hay repetitividad de los mismos. Debe sin embargo continuarse trabajando en el tema para validar y poder generalizar los resultados obtenidos en el proyecto.

**4. Productos:** productos pactados en el Acta de Trabajo y Compromiso y los finalmente obtenidos.

Tipo de producto	% de Cumplimiento	Indicador Verificable
Publicación de un (1) artículo en una revista indexada.	100%	Fue publicado el artículo "Experiences with non-intrusive monitoring of distribution transformers based on the on-line frequency response", en el Vol. 35 N° 1 del año 2015 de la revista Ingeniería e Investigación (Bogotá Colombia). Categoría A1 (Publindex – Colciencias).  Adicionalmente se envió el artículo "Experiencias en Colombia de la Respuesta en Frecuencia On-Line de Transformadores", a la revista Chilena de Ingeniería, Ingeniare, el cual está en proceso de revisión.
Realización de una (1) ponencia en un evento internacional.	100%	Se presentó la ponencia "Obtención de la respuesta en frecuencia on-line en un transformador de 28MVA 34.5/13.2 kV" en el evento internacional ALTAE 2015 realizado en Portoviejo, Manabí, Ecuador, los días 26-30 de Octubre de 2015.  Adicionalmente se presentaron ponencias sobre el tema en el evento SUMA en Colombia y en el congreso AMITE en México
Vinculación de un (1) estudiante en la maestría.	100%	Se vinculó en la Maestría de Ingeniería al estudiante Andrés Felipe Gallo, quien desarrollará su tema de trabajo de grado en la definición de esquemas de recierre, donde podrá considerarse como uno de los criterios de decisión la prueba de FRA on-line.
Formación de dos (2) estudiantes de pregrado.	100%	Con el presente proyecto de investigación desarrollaron sus tesis de pregrado los estudiantes: - Jairo Olarte. - Carlos Ordoñez. De igual manera se vincularon 3 estudiantes de pregrado en temas relacionados con el proyecto - Dixon Cuadros. - Byron López España. - Juan Sebastián Cuartas.

Tipo de producto	% de Cumplimiento	Indicador Verificable
Formación de 1 estudiante Semillero	100%	Se vinculó en el plan de semillero de investigación al estudiante Sebastián Giraldo
Propuesta presentadas a convocatorias externas	50%	Se está preparando una propuesta para ser presentada externamente, con una ejecución en 2 años (2016-2017), con el fin de continuar con el tema propuesta sobre FRA on-line en campo.

### 5. Impactos actual o potencial:

El proyecto realizado es de mucho interés para las empresas eléctricas del sector, debido a que aporta un avance considerable en la investigación sobre la obtención de la respuesta en frecuencia con el transformador en servicio, dado que se aumenta la confiabilidad en el sistema de potencia al no tener que desconectar el transformador para hacer la prueba FRA.

El desarrollo del presente proyecto de investigación fortaleció la investigación científica a la Universidad del Valle y al Grupo de Investigación en Alta Tensión GRALTA, colocándolo como pionero a nivel nacional en la realización de la prueba FRA on-line en transformadores.

Por otro lado se hizo un aporte a las empresas del sector eléctrico del país en el tema propuesto.

#### Formación de nuevos ingenieros e investigadores

Relacionados con el proyecto se realizaron cinco trabajos de grado del Programa de Ingeniería Eléctrica, dos de los cuales fueron culminados de manera exitosa y tres están en proceso:

1. Jairo Alberto Olarte (Validación y verificación de IFRA on-line en transformadores de potencia mediante el método de señales controladas). Trabajo Culminado. Con mención de Meritoria.
2. Carlos Alberto Ordoñez (Monitoreo on-line en transformadores mediante el análisis de la escala de señales transitorias usando transformada wavelet). Trabajo Culminado.
3. Dixon Efraín Cuadros (Identificación de las variaciones en la curva FRA on-line ante cambios de los parámetros internos y externos de un transformador piloto). Trabajo de grado en proceso.
4. Byron López España (Desarrollo de una herramienta computacional para el monitoreo en transformadores a partir de señales eléctricas transitorias en el dominio de la escala). Trabajo de grado en proceso.



5. Juan Sebastián Cuartas (Análisis de la fase de la impedancia eléctrica de un transformador obtenida a partir de señales transitorias). Trabajo de grado en proceso. Igualmente se inició un proyecto de tesis del Programa de Maestría en Ingeniería (Área de énfasis en Ingeniería Eléctrica), relacionado con el proyecto:
  
6. Andrés Felipe Gallo (Definición de esquemas de recierre considerando las principales variables que inciden sobre el estado de los transformadores de potencia). Tesis en proceso.

---

Firma del investigador principal

---

VoBo. Vicedecano de Investigaciones