 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Análisis de flujo de carga en microrredes de corriente continua

Jefferson Andrés Espejo Goez

Tecnología en Electromecánica

Director(es) del trabajo de grado

Luis Fernando Grisales Noreña, ITM

Oscar Danilo Montoya Giraldo, UTB

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

31 de enero de 2019

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El panorama ambiental a nivel mundial se está viendo drásticamente afectado por las repercusiones del uso de energías convencionales no renovables. Con el pasar de los días, se hace necesario el uso e implementación de energías alternativas que permitan dar paso a una nueva forma de generación ambiental y económicamente sostenible. Las microrredes (MRs) se plantean como una nueva alternativa a los sistemas eléctricos tradicionales donde se pueden implementar energías no convencionales, requiriendo la implementación de flujos de carga que permitan conocer el impacto de la generación y almacenamiento de energía en la red, para de esta manera cuantificar el impacto técnico, económico y ambiental. Reconociendo la importancia de los flujos de carga en estos sistemas y centrándose en los de corriente directa (DC), en este trabajo de investigación se realizó la identificación de los parámetros y componentes asociados a una red eléctrica de naturaleza DC de pequeña escala, en adelante conocida como microrred DC, a través de la compilación de información obtenida de bases de datos especializadas y libros. Obteniendo de este modo el modelo matemático que representa el problema de flujo de carga en MRs de DC, los sistemas de prueba más implementados (sistema de 10 y 21 nodos) y los principales métodos de solución del problema. Debido a los excelentes resultados y alta implementación para dar solución al problema de flujo de carga en MRs DC, se seleccionaron los métodos de Gauss-Seidel y Gauss-Jacobi para obtener solución del flujo de carga en los sistemas de prueba de 10 y 21 nodos, de lo cual se concluyó que el método de Gauss-Seidel es 50% más eficiente que el método de Gauss-Jacobi en términos de convergencia y tiempos de procesamiento.

Palabras clave: Microrredes, flujo de carga, corriente directa, método numérico, generación distribuida.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradezco a mi madre por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron siempre estuvo atenta y animándome a no desistir en los momentos críticos.

A mi director de tesis M.Sc. Luis Fernando Grisales Noreña, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me oriento en la investigación. Además, por su paciencia a la hora de orientarme por un camino nuevo y enseñarme que las cosas siempre pueden mejorar.

A mi mejor amigo M.Sc Diego Alejandro Grajales González, por estar siempre pendiente de mi estado de ánimo, motivarme a no desertar y recordarme que en el camino de la investigación siempre se puede aprender a redactar mejor.

Finalmente, agradezco a los todos docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional en el Instituto Tecnológico Metropolitano.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

MR Microrred

MRs Microrredes

MG Microgeneradores

AC corriente alterna

DC corriente directa

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	9
3. METODOLOGÍA.....	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	42
REFERENCIAS	44

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo del actual sistema de energía basado en el aprovechamiento de combustibles fósiles se encuentra en transición a un nuevo sistema con implementación de energías no convencionales y sistemas eléctricos de transporte que requieren el desarrollo de nuevos algoritmos que permitan gestionar de manera óptima los nuevos perfiles de consumo y generación, así como los problemas asociados a la intermitencia del sistema. Actualmente, las redes eléctricas operan en muchas ocasiones a su máxima capacidad y buscan adaptarse a cambios y retos medioambientales, con el fin de mejorar su confiabilidad; estos retos se solucionan con la integración de generadores distribuidos que facilitan la explotación de los recursos renovables y alternativos [1].

La idea de una red eléctrica de menor tamaño que permita gestionar los diferentes recursos energéticos y cargas, aparece como una nueva solución; sin embargo, esto trae consigo nuevos desafíos y retos desde la perspectiva del control [2], a este tipo red eléctrica se le conoce como microrred (MR). Si bien la definición formal de MR se encuentra aún a discusión, se puede considerar como *un conjunto de cargas, almacenadores de energía y generadores que pueden ser gestionados tanto de forma aislada como conectados a la red de suministro eléctrico* [1], *las cuales pueden operar en corriente alterna (AC) o directa (DC).*

En particular, las microrredes (MRs) de corriente directa están llamando la atención a nivel mundial principalmente por su simplicidad de operación, además, la mayoría de los dispositivos utilizados tanto a nivel industrial como residencial funcionan con corriente directa a través del uso de rectificadores. Analizando el problema desde dicha perspectiva, implementar una MR de corriente directa traería consigo una disminución en las pérdidas de energía debido a la conversión en todas las cargas, lo que conlleva a un mejor aprovechamiento de la energía obtenida de las diferentes fuentes de origen fósil y

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

renovable [3]. Para las MRs es fundamental el uso de flujos de potencia con el fin de conocer las diferentes variables del sistema eléctrico: tensiones y corrientes en las líneas [3], las cuales junto con los parámetros del sistema permiten identificar el impacto de los diferentes niveles de inyección, demanda y almacenamiento de energía en los indicadores o criterios técnicos dentro de la MR, como es el caso de las pérdidas de energía, balance de potencia, cumplimiento de los límites operativos de corriente y tensión, entre otros [4]. Los flujos de potencia son una herramienta con carácter indispensable en el estudio de sistemas eléctricos de potencia. Estos poseen una diversa cantidad de aplicaciones tanto en el análisis de la determinación para operar en condiciones óptimas, así como la planificación de futuras expansiones, entre otras [4].

Este proyecto de investigación propone la aplicación de métodos numéricos que permita realizar el análisis flujo de carga a MRs DC, con el fin de conocer las diferentes variables que representan el sistema, con lo cual se pueda establecer el estado técnico-operativo de la MR bajo un escenario de carga y generación constante para un instante de tiempo en específico, es decir, suposición de estado estable; lo cual es logrado a través de los siguientes objetivos:

Objetivo general

Identificar y aplicar métodos numéricos al problema de flujos de carga en MRs DC.

Objetivos específicos

- Identificar los diferentes criterios, importancia, parámetros y variables de los flujos de carga aplicados a MRs DC.
- Identificar y aplicar los sistemas de ecuaciones que representan las MRs DC.
- Estudiar y seleccionar métodos numéricos aplicados al problema de flujo de carga en MRs DC.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Seleccionar sistemas de pruebas existentes en la literatura para evaluar flujos de carga en MRs DC.
- Aplicar los métodos numéricos seleccionados a los sistemas de prueba para realizar el flujo de carga DC.

Este documento consta de 5 secciones. En la primera sección se presenta una introducción acerca del concepto de MR y el uso de los flujos de potencia en sistemas eléctricos. La segunda sección explica el marco teórico, donde se desarrollan la definición, los tipos, las componentes y topologías de las MRs DC, así como la definición de flujos de potencia. En la tercera sección se presenta la metodología empleada para dar solución a los objetivos planteados. En la cuarta sección se presenta la formulación matemática del problema de flujo de carga en MRs DC y son descritos los métodos numéricos seleccionados para brindar solución a dicho problema. Adicionalmente en esta sección son presentados los sistemas de prueba empleados para validar los métodos seleccionados y se realiza el análisis de los resultados. Finalmente, en la quinta sección se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MICRORRED

La definición de MR no presenta una única definición dentro de la literatura especializada. Según (Guerrero, Vasquez; 2009), una MR se define como una interfaz que permite la distribución bidireccional de energía eléctrica [5], mientras que (Velasco; 2012) define a la MR como un sistema de cargas y generadores a pequeña escala conectados con el único fin de proveer potencia [6]. La MR se encuentra compuesta por generadores, almacenadores de energía y el conjunto de cargas asociados a los usuarios conectados a ella, con la posibilidad de ser gestionados tanto de forma aislada o conectados a la red eléctrica con el fin de proporcionar energía de manera fiable [1],[7]. Actualmente existen dos tipos principales de MRs:

MRs AC

Las MRs AC, son MRs cuya corriente de funcionamiento es alterna, por lo cual presentan características propias de este tipo de corriente tales como generación de pérdidas por reactancia en las líneas de transmisión, así como la inclusión de la potencia reactiva en el estudio de su funcionamiento. Las MRs AC son altamente estudiadas hoy en día debido a su capacidad de operar directamente con la red principal o de forma aislada, siendo la sincronización de estas con la red principal una tarea difícil, debido que estas presentan un alto nivel de complejidad asociado a la necesidad de tener en cuenta la potencia reactiva, la estabilidad de la frecuencia de la red, así como el estudio de las tres fases del sistema [8]. Por otra parte, dado que el sistema posee un régimen sinusoidal, se debe realizar el estudio de los fenómenos que ocurren en su paso de transitorio a estado estable por medio de análisis fasoriales, a diferencia de la DC que no requiere el estudio de estos [9]; disminuyendo la complejidad al momento de analizar el estado operativo de la MR.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

MRs DC

Las MRs DC son un tipo de MR que funciona con corriente directa, debido a esto se exceptúan algunos cálculos imprescindibles en el estudio con AC, tales como el análisis de potencias reactivas y la inclusión de una notación fasorial en los cálculos por la presencia de corriente alterna, además de no requerir hacer análisis de frecuencias. Este tipo de MRs presenta ventajas frente a las MRs AC, dado que muchos de las cargas que presentan los usuarios actualmente funcionan a partir de DC, por lo cual este tipo de sistemas elimina la necesidad de incluir rectificadores, lo cual reduce los costos de inversión y pérdidas asociadas a la operación de las cargas. Además, este tipo de sistemas presenta niveles de pérdidas técnicas (pérdidas de energía y caídas de perfiles de tensión) inferiores a los sistemas AC asociadas al transporte de energía, permitiendo la reducción en el tamaño de los sistemas de transporte y las pérdidas asociadas, por medio de la implementación de generación distribuida [10].

Los diferentes elementos que componen las MRs son ampliados a continuación. Vale la pena destacar que a pesar de que las MRs AC no son el foco de atención de este documento, se presentan sus elementos y tipos para obtener una mejor interpretación de las MRs DC, e identificar sus diferencias con respecto a las AC.

2.1.1 Elementos que componen una MR

A continuación, se realizará una descripción de cada uno de los elementos que componen una MR:

Generadores Distribuidos (GD): los generadores distribuidos son generadores cuyo nivel de potencia es considerablemente bajo a comparación de los generadores centralizados, estos oscilan entre 15 kW y 20 MW, generalmente se encuentran

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ubicados cerca a los lugares de consumo [12]. Estos generadores pueden operar en forma aislada o conectados a la red, suministrando potencia a la red a través de convertidores DC/AC, para el caso específico de las MRs DC [11]. Las MRs permiten la integración de energías tanto convencionales como no convencionales por medio de los generadores distribuidos, los cuales son ampliados a continuación:

GD empleando energía convencional:

Las energías convencionales son aquellos tipos de energía cuyo uso es más frecuente actualmente y, generalmente su producción se deriva de una fuente no renovable. Este tipo de energía se genera con el fin de transformarla en energía eléctrica, sin embargo, estas poseen un tiempo de vida limitado y a su vez esto repercute en un aumento considerable de inversión para su obtención [13]. Entre las fuentes de energía convencionales más utilizadas se encuentran las siguientes:

- Energía nuclear
- Gas natural
- El petróleo
- Carbón mineral
- Energía hidráulica
- Energía térmica (de origen fósil)

GD empleando energía no convencional:

Las energías no convencionales o renovables son aquellos tipos de energía cuya tasa de uso a nivel mundial es baja, además, su uso es limitado por los altos costos de producción que conlleva la obtención de estas y su posterior transformación en energía eléctrica; sin embargo, estas poseen la característica de afectar en muy poco el medio ambiente y su fuente de energía es ilimitada, sea el sol en el caso de la energía fotovoltaica, o el viento

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

en el caso de la energía eólica [14]. A continuación, se realizará una descripción de las energías renovables más comunes:

Fotovoltaica: el sol es la mayor fuente de energía libre inagotable. La energía fotovoltaica se obtiene a partir de la transformación de radiación solar a energía eléctrica. Esto se consigue con el uso de semiconductores (generalmente silicio) mediante células fotovoltaicas. Entre las energías renovables esta es la más famosa debido a su versatilidad, ya que se puede hacer uso de los paneles para alimentar diferentes dispositivos eléctricos y electrónicos, abastecer viviendas o industrias, o finalmente a gran escala suministrar energía eléctrica a la red principal [15].

Pequeña central hidroeléctrica (PCH): las PCH se definen como sistemas de generación a baja escala que implementan como recurso energético el agua. Estas poseen instalaciones con generadores que permiten convertir la energía mecánica generada por el movimiento de la turbina a causa del caudal del río, en energía eléctrica. A nivel general, se considera que una hidroeléctrica se encuentra en esta categoría si el nivel de potencia generado por esta es menor a 30 MW [16].

Eólica: la energía eólica es la energía obtenida a partir del viento, principalmente con el fin de convertirse en energía eléctrica a través de los aerogeneradores. Cuando se requiere una gran cantidad de energía suministrada por estos se construye un parque eólico, el cual no es más que un conjunto de generadores eólicos conectados a la red eléctrica. Generalmente estos generadores son de gran tamaño y se encuentran ubicados en zonas donde las condiciones meteorológicas favorecen un gran afluente de aire, sin embargo, también existen unos más pequeños con la posibilidad de ser instalados cerca a zonas residenciales [17].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Biomasa: está compuesta por material orgánico de origen animal y vegetal, incluyendo los residuos orgánicos de procesos industriales. La energía obtenida a partir de biomasa es la alternativa más compleja entre los diversos tipos de energías renovables, esto en gran parte debido al amplio espectro de rendimientos, así como sus múltiples procesos de conversión [18]. El proceso de obtención de la energía consiste en la transformación de diversos tipos de materia orgánica en energía eléctrica [18].

Almacenadores de energía (AE): su papel dentro de las MRs es fundamental, ya que estos son encargados de almacenar energía con el fin de suministrarla en el momento más oportuno, ya sea para garantizar el balance de potencia global del sistema o para comercialización de la energía eléctrica generada [19]. Su principal característica en términos generales es permitir la absorción o inyección de potencia al sistema eléctrico. A continuación, se realizará una breve descripción de los AE más conocidos e implementados actualmente:

Baterías: son elementos con la capacidad de almacenar energía eléctrica, y liberarla a partir de un proceso electroquímico. El principio de su funcionamiento es la reacción entre 2 electrodos separados por un electrolito [19]. Existen diferentes tecnologías con la cuales se puede construir una batería, entre estas se tienen: Plomo-Ácido, Niquel-Cadmio, ión de Litio y polímero de Litio. Dependiendo de la tecnología seleccionada se puede definir el costo, capacidad, vida útil, entre otras características. Su principal característica es que permite niveles bajos de potencia en tiempos prolongados de tiempo [19].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Supercondensadores: estos son condensadores electroquímicos, poseen características tanto de condensadores convencionales como de baterías. Estos poseen la capacidad de almacenar grandes cantidades de energía, para liberarla en un intervalo de tiempo muy pequeño. Su eficiencia puede rondar alrededor del 98% y posee una vida útil de aproximadamente 10 años, mucho mayor que la de condensadores convencionales [19].

Dentro de las MG operando en modo aislado es de vital importancia el uso de almacenadores de energía, dado que estos son los que garantizarán el balance de potencia global [20].

Cargas: las cargas representan la demanda de potencia activa y reactiva de los elementos o conjuntos de elementos conectados al sistema eléctrico [21]. Existen 3 tipos de cargas: impedancia constante, voltaje constante y corriente constante. A continuación, se realizará una descripción de estas:

Cargas impedancia constante: esta carga posee la propiedad de que la potencia varía directamente con el cuadrado de la magnitud del voltaje [22].

Cargas de potencia constante: esta carga posee la propiedad de que la potencia es invariante ante cambios de voltaje. Por consiguiente, ante un aumento de la tensión en la carga, ocurrirá una disminución de la corriente con el fin de que la potencia en la carga tenga un valor constante. [23]

Carga de corriente constante: esta carga posee la propiedad que la corriente que circula a través de esta es constante, por este motivo la impedancia, así como la potencia de la carga tienden a variar. [23]

Estos modelos de carga pueden ser usados para su estudio en un tiempo específico, o para realizar el estudio de su comportamiento en el transcurso de un día completo a través de una curva de carga [24].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Nodos: se define un nodo como el punto común de acople de conductores, generadores, almacenadores y cargas [25]. La clasificación de los nodos cambia si se trabaja en una MR AC o DC.

Clasificación de nodos en sistemas AC: existen 3 tipos de nodos [21]:

Nodo de referencia (Slack): Es el nodo “infinito”, ya que se consideran su potencia activa y reactiva debe ser suficiente para abastecer las potencias demandas por el sistema; es decir, debe contar con los recursos de potencias suficientes para garantizar el balance global de potencia en el sistema. Por esta característica, este se toma como referencia para realizar los cálculos de flujo de potencia. La tensión y su ángulo son fijos independientemente del flujo de potencia [26].

Nodo de tensión controlada (PV): Es el nodo cuya potencia activa y tensión es fija, presentado potencia reactiva variable y ángulo de tensión asociada a las necesidades del sistema. A este nodo se le conectan varios generadores que puedan garantizar el mismo nivel de tensión e inyecten la suficiente potencia reactiva para mantenerla [26].

Nodo de carga (PQ): Es el nodo en el cual la potencia tanto activa como reactiva que se suministra es constante (carga constante), el valor de la tensión y su ángulo no se conoce. Vale la pena destacar que en este nodo no hay generadores, solo cargas [26].

Clasificación de nodos en sistemas DC: los nodos en los sistemas DC se clasifican de acuerdo a las características de las cargas asociadas al nodo y si existe la posibilidad de controlar o no lo la tensión nodal. La clasificación de los diferentes nodos en MRs DC se presenta a continuación:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Voltaje constante (V): este nodo es el que incluye el convertidor de subestación principal y cualquier convertidor a lo largo de la red que pueda mantener el voltaje constante [27]. Puede ser la red eléctrica, un generador diésel o un sistema de baterías con la capacidad de potencia suficiente para controlar la tensión de la red [23].

Potencia constante (P): son los nodos a los cuales se asocian generadores y cargas de potencia constante, los cuales no pueden controlar la tensión nodal [23], pero si mantienen sus niveles de potencia inyectada o generada constantes en todo momento. Un ejemplo de esto son los generadores distribuidos y las cargas de potencia constante como es el caso de los motores DC [23].

Resistencia constante (R): son los nodos a los cuales se conectan cargas impedancia constante, la cuales mantienen su nivel de resistencia constante en todo momento para un intervalo de tiempo específico [23]. Un ejemplo de esto son las bombillas incandescentes.

Líneas: las líneas eléctricas son un elemento mediante el cual se unen dos o más nodos dentro de una red o MR con el fin de transportar la energía eléctrica. Estas se modelan mediante una resistencia propia del material usado (R) y una reactancia (X) debido al paso de corriente a través del conductor lo cual genera flujos magnéticos [21]. Es de resaltar que dentro de las MRs en DC es despreciada la reactancia en la línea porque por esta solo circulará corriente directa y bajo esta corriente, la parte imaginaria de la impedancia en la red será despreciable [28].

Topología de las redes eléctricas: sin importar el tipo (AC o DC), o el nivel de tensión al cual se encuentre el sistema eléctrico, este presenta dos tipos de topologías:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

radial y enmallada. A continuación, se realizará la descripción de cada una de ellas [29]:

Topología radial: en este tipo de topología se alimenta a la red desde uno o más puntos generalmente provenientes de una subestación, con la característica principal de que esta se ramifica como un árbol y sus ramas nunca generan mallas en el sistema. Este tipo de topología es bastante utilizada al ser económica, sin embargo, ante una falla en una fuente de alimentación todas las cargas después de éste elemento quedarán desabastecidas [29]. En la figura 1 se puede observar el ejemplo de una MR con topología radial, en esta se puede apreciar que las cargas no comparten un punto común.

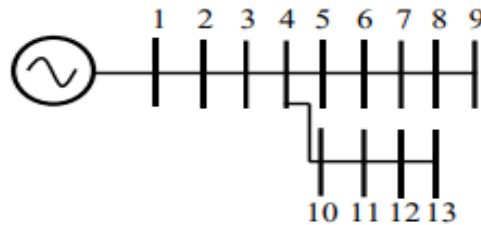


Figura 1. MR con topología radial **tomada de:** [30].

Topología enmallada: es una topología que posee la principal característica de que sus ramas pueden formar anillos o mallas. Esta topología ofrece mucho mayor seguridad que la anterior, dado que ante una falla en una fuente de alimentación, la carga puede ser abastecida desde otro punto, sin embargo, esto eleva los costos [29]. En la figura 2 se puede observar una MR con topología enmallada y como sus ramas se unen dando forma a una malla.

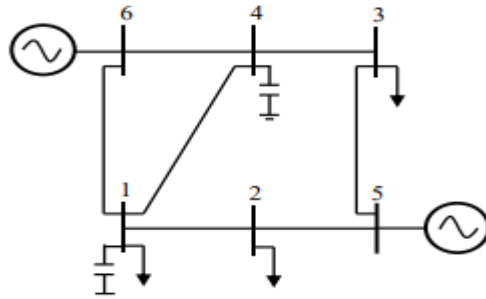


Figura 2. MR con topología enmallada **tomada de** [30].

2.2 Flujos de carga o potencia:

Los flujos de potencia son una herramienta que se estudia desde la rama de la ingeniería eléctrica, dado que es de vital importancia para el análisis de sistemas eléctricos de potencia. El propósito principal de estos flujos, es calcular de forma fiable los voltajes en los nodos del sistema, asumiendo que el sistema se encuentra en estado estable [31].

El estudio de estos flujos se realiza mediante el uso de diversos métodos numéricos, debido a que generalmente cuando se obtienen los datos del sistema resulta ser un sistema de ecuaciones no lineales. Para el flujo de potencia se deben tener en cuenta diferentes factores técnicos propios del sistema tales como corriente en las líneas, bajo un supuesto de generación y carga conocidas. Vale la pena recalcar que, por medio de flujo de carga óptimo, se pueden llegar a determinar las mejores condiciones operativas de un sistema eléctrico en función del objeto de optimización, es decir, pérdida de energía o costos, entre otros [4].

El flujo de potencia presenta dos variaciones: AC y DC. El primero presenta una mayor dificultad debido a la inclusión de variable compleja para su estudio, mientras que el segundo a pesar ser también no lineal, solo involucra números reales, lo cual trae consigo un ahorro significativo en la obtención de datos y su posterior procesamiento a través del uso de alguno de los diversos métodos numéricos desarrollados [4]. Dentro de este proyecto de investigación serán planteados y desarrollados flujos de carga DC, empleando métodos numéricos y sistemas de prueba empleados en la literatura especializada.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto de investigación se desarrolló en cinco etapas, las cuales se especifican a continuación:

En la etapa uno se realizó una compilación de información acerca de MRs tanto de corriente alterna como continua para identificar la importancia y relevancia de este tipo de sistemas dentro de los sistemas eléctricos de potencia. A partir del análisis de artículos, libros y textos relacionados se identificó los diferentes parámetros y variables que representan este tipo de sistemas y sus características principales. Enfocándose principalmente en los sistemas de corriente continua, los cuales son el foco de investigación de este proyecto de investigación.

Posteriormente a partir de la identificación de los parámetros y variables que representan las MRs de CC, se analizó y se seleccionó de la literatura especializada el modelo matemático que representan el problema de flujo de carga para este tipo de sistemas. Brindando claridad de cuáles son las variables al momento de solucionar el problema.

En la etapa tres se realizó una búsqueda en la literatura especializada, identificando los principales métodos numéricos aplicados al problema de flujo de carga en MRs de corriente continua. A partir del análisis de los resultados y la comparación entre estos fueron seleccionados el método de Gauss-Seidel y Gauss-Jacobi, debido a su facilidad a la hora de programar y requerir de cálculos mínimos.

En busca de evaluar el modelo matemático y los métodos numéricos de solución seleccionados, en la etapa 4 de la metodología se realizó una selección de los sistemas de prueba más empleados dentro de la literatura especializada dentro de las MRs DC. Seleccionando el sistema de 10 y 21 nodos.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Finalmente, buscando realizar una comparativa entre los métodos seleccionados, se realiza la aplicación de estos a los sistemas de prueba seleccionados y de esta forma determinar cuál es más eficiente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Planteamiento matemático del problema flujo de carga en MRs DC

Un modelo que representa un sistema de potencia sienta sus bases en los circuitos eléctricos. De las cuales se toman ciertas relaciones y conceptos para aplicarlos a problemas de mayor complejidad. La ley de Ohm, establece que la tensión en un elemento es equivalente al producto de la corriente que circula por el mismo y su resistencia (para el caso de corriente directa) [28]; sin embargo, para el análisis de sistemas de potencia por facilidad se usa el inverso de la resistencia: la conductancia (G). Para la conductancia la ley de Ohm establece que la tensión en un elemento es equivalente a la corriente que pasa por el mismo dividida sobre la conductancia del material.

$$V = IR \quad (1)$$

$$V = \frac{I}{G} \quad (2)$$

Dado un sistema de N nodos, el cual genera N ecuaciones, la corriente de cada nodo se puede modelar de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1N} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{N1} & G_{N2} & \cdots & G_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde:

G_{KK} = Suma de las conductancias conectadas al nodo K.

$G_{kj} = G_{jk}$ = Representa el valor negativo de la conductancia que conecta el nodo k y el nodo j, tal que $j \neq k$.

v_k = Voltaje en el nodo k

i_k = Corriente en el nodo k.

En términos generales la ecuación anterior puede representada de la siguiente manera:

$$[G][V] = [I] \quad (4)$$

Donde G es la matriz de conductancias, v es el vector de tensiones nodales e I es el vector de corrientes nodales.

Para el caso en el cual se conozcan las corrientes del sistema a trabajar, se puede usar el modelo anteriormente planteado. En caso contrario, se debe realizar una adaptación haciendo uso del Teorema de Tellegen para potencia instantánea .

$$P = VI \quad (5)$$

$$I = \frac{P}{V} \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación (6) en (4), el modelo anterior se puede representar de la siguiente forma:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1N} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{N1} & G_{N2} & \cdots & G_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1/v_1 \\ p_2/v_2 \\ \vdots \\ p_N/v_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

Expresando la ecuación general que representa este problema e flujo de carga en MRs de corriente continua, se obtiene la formula del balance de energía, la cual representa la formulación matemática del problema:

$$P_i^g - P_i^d = v_i \sum_{j \in N} G_{ij} v_j, \forall i \in N \quad (8)$$

Donde:

P_i^g =Potencia generada por el nodo.

P_i^d =Potencia demandada por el nodo.

Analizando la ecuación (8), se puede observar que el problema de flujo de carga en MRs de corriente continua es no lineal, por lo tanto, debe hacerse uso de métodos numéricos para su respectiva solución.

Dado que la formulación del problema se realiza para encontrar las tensiones nodales del sistema eléctrico, y en función de estas y la implementación de los parámetros hallar las corrientes nodales, la ecuación de balance de energía presenta en 8 puede ser simplificada como se muestra en la ecuación (9). Donde son eliminados los nodos de tensión constante.

$$-P_k^d = v_k \sum_{j \in N} G_{kj} v_j, \forall k \in d \quad (9)$$

Donde d es el conjunto que reúne a los nodos con voltaje desconocido (nodos de consumo).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Consideraciones aplicadas al flujo de potencia en MRs DC

Al momento de resolver el problema de flujo de carga en MRs DC se deben tener en cuenta algunas consideraciones adicionales:

Considérese **N** como el conjunto de todos los nodos del sistema y **E** como el conjunto de todas las líneas del sistema, tal que:

- Existe por lo menos un nodo cuyo voltaje no es variable (Nodo de tensión constante), el cual tiene a capacidad de suplir toda la potencia requerida por el sistema.
- Existe por lo menos un nodo cuya potencia es constante (Nodo de potencia constante).
- La red se encuentra conectada, es decir, no hay presencia de nodos aislados.
- La red DC se encuentra operando bajo condición estable, es decir, no hay perturbaciones que le afecten.
- Las soluciones de voltaje se encuentran bajo el siguiente intervalo

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (10)$$

- Los nodos que controlan potencia pueden consumir o generar lo que sea necesario para satisfacer el voltaje en sus respectivos terminales.

4.2 Sistemas de prueba

Dentro de este proyecto de investigación fueron seleccionados dos sistemas de pruebas empleados en la literatura especializada, la topología y los parámetros asociados a cada sistema se presentan a continuación.

Sistema de 10 nodos:

El primer sistema de prueba corresponde a un sistema de 10 nodos de una red de corriente directa de baja tensión propuesto en [32]. La respectiva configuración eléctrica y parámetros de este sistema de prueba se encuentra en la Figura 3 y Tabla 1, respectivamente.

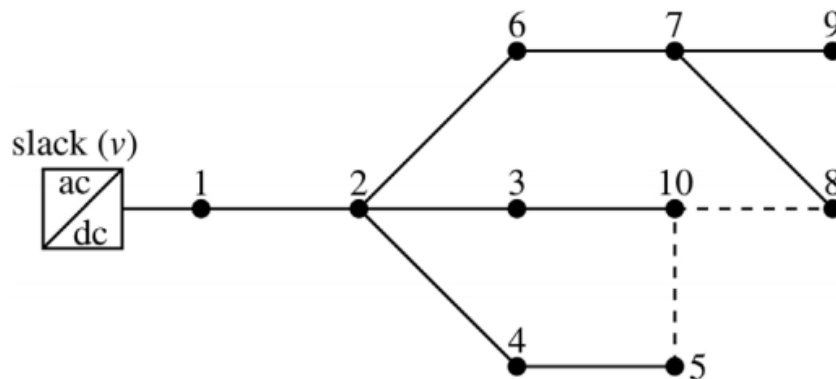


Figura 3. Configuración eléctrica del sistema de prueba de 10 nodos. [30].

Dentro de la Tabla 1, la primera columna presenta el nodo de envío, la segunda el nodo de recibo, la tercera columna presenta la resistencia de la línea que conecta al nodo de envío con el nodo recibo, la cuarta columna corresponde al tipo de nodo, por último, la quinta columna presenta la potencia o resistencia asociada al nodo de recibo que se muestra en la columna 2; si la potencia asignada es positiva se asume que consume potencia, en caso contrario inyecta potencia a la red (generados distribuido). Es importante resaltar que en esta configuración eléctrica el nodo 1 es el nodo de control de tensión, por lo cual no posee potencia ni carga asociada a este.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 1. Parámetros eléctricos para un sistema de prueba de 10 nodos [30].

Envío	Recibo	R (pu)	Tipo de nodo	P (pu)-R (pu)
1 (slack)	2	0.0050	Nodo de paso	-
2	3	0.0015	P	-0.8
2	4	0.0020	P	-1.3
4	5	0.0018	P	0.5
2	6	0.0023	R	2.0
6	7	0.0017	Nodo de paso	-
7	8	0.0021	P	0.3
7	9	0.0013	P	-0.7
3	10	0.0015	R	1.25

Sistema de 21 nodos:

Este sistema de prueba está conformado por 21 nodos con múltiples cargas de potencia constante y generadores distribuidos [32]. La Figura 4 presenta la configuración del sistema de prueba y la Tabla 2 expone los parámetros de la red y consumos de potencia.

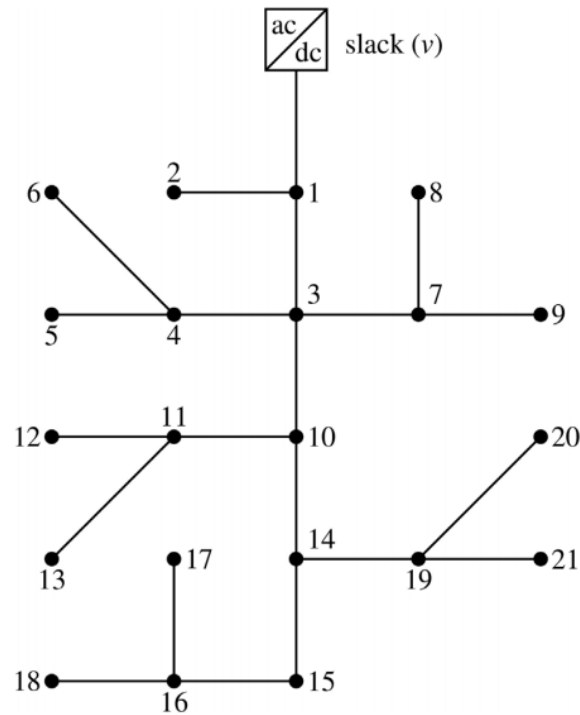


Figura 4. Configuración eléctrica para sistema de prueba de 21 nodos tomada de: [30].

Dentro de la Tabla 2, la primera columna presenta el nodo de envío, la segunda el nodo de recibo, la tercera columna presenta la resistencia de la línea que conecta al nodo de envío con el nodo recibo, por último, la cuarta columna presenta la potencia asociada al nodo de recibo que se muestra en la columna 2; si la potencia asignada es positiva se asume que consume potencia, en caso contrario inyecta potencia a la red (generadores distribuido). Es importante resaltar que este sistema no considera cargas resistivas, solo contiene de potencia contante.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO		Código	FDE 089
			Versión	03
			Fecha	2015-01-22

Tabla 2. Parámetros eléctricos para un sistema de prueba de 21 nodos.

Envío	Recibo	R (pu)	P (pu)	Envío	Recibo	R (pu)	P (pu)
1 (slack)	2	0.0053	-0.70	11	12	0.0079	-0.68
1	3	0.0054	0.00	11	13	0.0078	0.1
3	4	0.0054	-0.36	10	14	0.0083	0
4	5	0.0063	-0.04	14	15	0.0065	0.22
4	6	0.0051	0.36	15	16	0.0064	-0.23
3	7	0.0037	0.00	16	17	0.0074	0.43
7	8	0.0079	-0.32	16	18	0.0081	-0.34
7	9	0.0072	0.80	14	19	0.0078	0.09
3	10	0.0053	0.00	19	20	0.0084	0.21
10	11	0.0038	-0.45	19	21	0.0082	0.21

4.3 Métodos numéricos

A continuación, serán presentados los métodos numéricos de Gauss-Jacobi y Gauss-Seidel, empleados para solucionar el problema de flujo de carga en MRs de corriente continua. Se iniciará con una descripción general de cada método para posteriormente indicar la reformulación empleada para solucionar la problemática bajo análisis.

4.3.1 Aplicación de método numérico Gauss-Jacobi al problema de flujo de carga en MRs DC

4.3.1.1 método numérico Gauss-Jacobi

El método iterativo de Gauss-Jacobi, es un método clásico empleado para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales y no lineales, la solución del problema se obtiene al resolver la i -ésima ecuación que se presenta en (11) [33], [34]:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$Ax = b \quad (11)$$

Donde:

A: Matriz de coeficientes.

x : Vector de incógnitas.

b : Vector de términos independientes.

En la ecuación (11) la matriz A puede representarse como la suma de dos matrices:

$$A = D + R \quad (12)$$

Donde D es una matriz cuyos elementos de la diagonal principal son distintos de cero e iguales a los elementos de la diagonal de la matriz A, y los demás elementos de esta son iguales a cero. Mientras que R es una matriz cuyos elementos de la diagonal principal son iguales a cero y los demás son el resto de los elementos de la matriz A. Es importante resaltar que al sumar D+R debe ser igual a la matriz A (ver ecuaciones 13 a 15) [34].

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 0 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Para obtener el sistema de ecuaciones que permite obtener el vector de variables del problema, implementado las matrices R y D, se inicia sustituyendo la ecuación (12) en (11):

$$(D + R)\vec{X} = \vec{b}$$

$$D\vec{X} + R\vec{X} = \vec{b}$$

Despejando el termino $D\vec{X}$:

$$D\vec{X} = \vec{b} - R\vec{X}$$

Multiplicando a ambos lados por D^{-1} :

$$D^{-1}D\vec{X} = D^{-1}(\vec{b} - R\vec{X})$$

Da como resultado:

$$\vec{X} = D^{-1}(\vec{b} - R\vec{X}) \quad (16)$$

La ecuación (16) es la ecuación de recurrencia en el método de Jacobi. Para dar solución a esta, se toma una aproximación inicial para las soluciones y se designa dicho vector como \vec{X}_0 , con el fin de volver esto un proceso iterativo, se realiza una modificación a la ecuación (16), dicha modificación presentada en (17) permite resolver el sistema con un proceso iterativo.

$$\vec{X}^{k+1} = D^{-1}(\vec{b} - R\vec{X}^k) \quad \forall \quad k = 0,1,2,3, \dots, n \quad (17)$$

Donde \vec{X}^k representa un vector de soluciones iniciales y \vec{X}^{k+1} representa un vector de soluciones aproximadas posterior a la inicial \vec{X}^k . La ecuación (17)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

requiere un breve análisis anterior a su aplicación. Inicialmente la matriz D carece de elementos distintos de cero a excepción de su diagonal principal, la cual corresponde a la diagonal principal de A . A su vez, es relativamente fácil demostrar que la matriz inversa de D también posee valores distintos de cero solamente en su diagonal principal y que dichos valores corresponden a los recíprocos de sus valores en la matriz A , es decir, serán $\frac{1}{a_{ii}}$. Al mismo tiempo, el resto de los elementos de A se encuentran en la matriz R y son restados del vector \vec{b} [34]. En consecuencia, la ecuación (17) equivale, a partir del sistema de ecuaciones, a despejar la incógnita ubicada en la diagonal principal de cada una de las ecuaciones que conforman el sistema, tal como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
x_1^{(k+1)} &= \frac{b_1 - (a_{12}x^{(k_2)} + a_{13}x^{(k_3)} + \dots + a_{1n}x^{(k_n)})}{a_{11}} \\
x_2^{(k+1)} &= \frac{b_2 - (a_{21}x^{(k_2)} + a_{23}x^{(k_3)} + \dots + a_{2n}x^{(k_n)})}{a_{22}} \\
x_3^{(k+1)} &= \frac{b_3 - (a_{31}x^{(k_2)} + a_{32}x^{(k_3)} + \dots + a_{3n}x^{(k_n)})}{a_{33}} \\
&\vdots \\
x_n^{(k+1)} &= \frac{b_n - (a_{n1}x^{(k_2)} + a_{n2}x^{(k_3)} + \dots + a_{nn-1}x_{n-1}^{(k_n)})}{a_{nn}}
\end{aligned} \tag{18}$$

La cual puede expresarse en una forma más compacta al representarse en términos de una sumatoria, como se muestra a continuación:

$$x_i^{t+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{k=1, i \neq k}^N a_{kj} x_k^t \right) \tag{19}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El método de Gauss-Jacobi es susceptible respecto a los efectos del pivoteo del algebra matricial. Dado esto, su criterio de convergencia lo conforman los criterios de la diagonal dominante, mismo que posee dos condiciones:

1. Condición necesaria: Es condición necesaria que el elemento ubicado en la diagonal principal de cada ecuación sea mayor en valor absoluto que el resto de los elementos de su respectiva ecuación [34].

$$|a_{ii}| > |a_{ij}| \quad (20)$$

2. Condición suficiente: Es condición suficiente que el elemento ubicado en la diagonal principal de cada ecuación sea mayor en valor absoluto a la suma del resto de los elementos de su misma ecuación [34] .

$$|a_{ii}| > \sum |a_{ij}| \quad (21)$$

Criterios de parada

Como criterio de convergencia el método Gauss-Jacobi emplea el error al comparar el vector de solución actual con el anterior o un número máximo de iteraciones. Es importante resaltar que tanto el error como el número de iteraciones asignado dependerá del problema bajo análisis.

4.3.1.2 Adaptación de método numérico Gauss-Jacobi para resolver el problema de flujo de potencia en DC.

Con el fin de realizar la adaptación del método de Gauss-Jacobi para resolver el problema de flujo de carga, se requiere replantear la ecuación (9) correspondiente a la potencia demandada por los nodos, como se muestra a continuación:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\frac{-P_k^d}{v_k} = \left(\sum_{j \in N} G_{kj} v_j \right), \quad \forall k \in d \quad (22)$$

Posteriormente, se separa la sumatoria en dos partes, de modo que los términos de la diagonal principal queden por fuera de esta:

$$\frac{-P_k^d}{v_k} = G_{kk} v_k + \sum_{j \in N, j \neq k} G_{kj} v_j, \quad \forall k \in d \quad (23)$$

A partir de la ecuación (23) es despejado v_k , obteniendo la ecuación (24):

$$v_k = \frac{1}{G_{kk}} \left(\frac{P_k^d}{v_k^t} - \sum_{j \in N, j \neq k} G_{kj} v_k \right), \quad \forall k \in d \quad (24)$$

Donde se pueden apreciar las equivalencias entre (19) y (24) para el respectivo desarrollo de la solución usando el método numérico seleccionado. Por lo cual la ecuación puede ser replanteada de tal modo que sea posible resolverla de manera iterativa, siendo v_k^t y v_k^{t+1} los vectores de punto inicial y posterior, respectivamente. Es importante resaltar que se requiere de un punto iniciales de las tensiones del sistema para lo cual tradicionalmente se emplea una tensión de 1pu. Para todos los nodos [31].

$$v_k^{t+1} = \frac{1}{G_{kk}} \left(\frac{P_k^d}{v_k^t} - \sum_{j \in N, j \neq k} G_{kj} v_k^t \right), \quad \forall k \in d \quad (25)$$

A continuación, se presenta la analogía entre los términos que componen la ecuación 23 y 19:

$$G_{kk} = a_{ii}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\frac{p_k^d}{v_k^t} = b_i$$

$$G_{kj}v_k^t = a_{kj}x_k^t$$

Es importante resaltar que el problema de flujo de carga cumple con la condición necesaria y suficiente de convergencia planteada por las ecuaciones (20) y (21). Esto debido a la forma de calcular las componentes de la matriz de conductancias G.

4.3.2 Gauss-Seidel

4.3.2.1 método numérico Gauss-Seidel

El método de Gauss-Seidel es una versión mejorada del método de Gauss-Jacobi. En el método de Gauss-Jacobi es estrictamente necesario contar con un vector completo de aproximaciones para proceder a la sustitución en las ecuaciones y de esta forma obtener una nueva aproximación. En el método de Gauss-Seidel se implementa la sustitución de los nuevos valores en las ecuaciones de recurrencia faltantes conforme se vayan obteniendo sin necesidad de tener un vector completo. De esta forma la convergencia se obtiene más rápidamente. A partir de las ecuaciones de recurrencia de Jacobi (18) y considerando lo anteriormente planteado se obtiene el sistema de ecuaciones de n variables:

$$x_1^{(k+1)} = \frac{b_1 - (a_{12}x_2^{(k)} + a_{13}x_3^{(k)} + \dots + a_{1n}x_n^{(k)})}{a_{11}}$$

$$x_2^{(k+1)} = \frac{b_2 - (a_{21}x_1^{(k+1)} + a_{23}x_3^{(k+1)} + \dots + a_{2n}x_n^{(k)})}{a_{22}}$$

$$x_3^{(k+1)} = \frac{b_3 - (a_{31}x_1^{(k+1)} + a_{32}x_2^{(k+1)} + \dots + a_{3n}x_n^{(k)})}{a_{33}}$$

$$\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$x_n^{(k+1)} = \frac{b_n - (a_{n1}x_2^{(k+1)} + a_{n2}x_3^{(k+1)} + \dots + a_{nn-1}x_{n-1}^{(k)})}{a_{nn}} \quad (26)$$

Con el fin de representarse en una forma más compacta para sistemas de n-ecuaciones, la ecuación (26) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$x_k^{(k+1)} = \frac{b_i - \sum_{j \in N, j > k}^N a_{kj} x_k^k - \sum_{j \in N, j < k}^N a_{kj} x_k^{k+1}}{a_{ii}} \quad (27)$$

4.3.1.2 Adaptación de método numérico Gauss-Seidel para resolver el problema de flujo de potencia en DC.

Para realizar la adaptación del método de Gauss-Seidel para resolver el problema de flujo de carga, se requiere replantear la ecuación (9) correspondiente a la potencia demandada por los nodos, como se muestra a continuación:

$$\frac{-P_k^d}{v_k} = \left(\sum_{j \in N} G_{kj} v_j \right), \quad \forall k \in d \quad (28)$$

Posteriormente, se separa la sumatoria en dos partes, de modo que los términos de la diagonal principal queden por fuera de esta:

$$\frac{-P_k^d}{v_k} = G_{kk} v_k + \sum_{j \in N, j \neq k} G_{kj} v_j, \quad \forall k \in d \quad (29)$$

A partir de la ecuación (29) es espejado v_k , obteniendo la ecuación (30):

$$v_k = \frac{1}{G_{kk}} \left(\frac{P_k^d}{v_k^t} - \sum_{j \in N, j \neq k} G_{kj} v_k \right), \quad \forall k \in d \quad (30)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Posterior a esto, se separa la sumatoria en dos de tal modo que considere las tensiones actualizadas anteriores a el elemento k.

$$v_k = \frac{1}{G_{kk}} \left(\frac{P_k^d}{v_k^t} - \sum_{j \in N, j > k} G_{kj} v_k - \sum_{j \in N, j < k} G_{kj} v_k \right), \forall k \in d \quad (31)$$

Donde se pueden apreciar las equivalencias entre (31) y (27) para el respectivo desarrollo de la solución usando el método numérico seleccionado. Por lo cual la ecuación puede ser replanteada de tal modo que sea posible resolverla de manera iterativa, siendo v_k^t y v_k^{t+1} los vectores de punto inicial y posterior respectivamente. Es importante resaltar que para el método de Gauss-Seidel al igual que el método Gauss-Jacobi, se requiere de un punto inicial de las tensiones del sistema, para lo cual tradicionalmente se emplea una tensión de 1pu. Para todos los nodos [31].

$$v_k^{t+1} = \frac{1}{G_{kk}} \left(\frac{P_k^d}{v_k^t} - \sum_{j \in N, j > k} G_{kj} v_k^t - \sum_{j \in N, j < k} G_{kj} v_k^{t+1} \right), \forall k \in d \quad (32)$$

4.4 Aplicación y comparación de los métodos numéricos para solucionar el problema de flujo de carga en MRs DC

Debido que el flujo de carga permite hallar las tensiones nodales con las cuales se pueden calcular las corrientes y los diferentes indicadores que representan los sistemas de potencia, en esta sección analizarán únicamente las tensiones para identificar el impacto de los métodos de solución propuestos. Empleando como sistemas de prueba los sistemas de 10 y 21 nodos descritos en la sección 4.2 de este documento.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las simulaciones fueron llevadas a cabo en un equipo con 8gb de ram, procesador INTEL (R) Core™ I5-7300HQ at 3.5 GHZ, corriendo Windows 10 como sistema operativo.

4.4.1 Sistema de pruebas de 10 nodos:

Resultados método Gauss-Jacobi:

Las tensiones obtenidas haciendo uso del método de Gauss-Jacobi se presentan en la Tabla 3, donde además se muestra el nodo asociado a cada tensión. Esta simulación fue realizada basándose en los datos de la Tabla 1. Este método presenta un total de 612 iteraciones y un tiempo de computo de 0.0217 segundos.

Tabla 3. Tensiones nodales utilizando Gauss-Jacobi en el sistema de 10 nodos.

Nodo	Tensión
1	1
2	0.98342973
3	0.98103072
4	0.98179914
5	0.98271497
6	0.98136107
7	0.98066620
8	0.98130821
9	0.97973739
10	0.97985490

Resultados Gauss-Seidel:

Las tensiones obtenidas haciendo uso del método de Gauss-Seidel se presentan en la Tabla 4, donde además se provee del nodo asociado a cada tensión. Esta simulación fue realizada basándose en los datos de la Tabla 1. Este método presenta un número de 312 iteraciones y un tiempo de computo de 0.0116 segundos.

Tabla 4. Tensiones nodales utilizando Gauss-Seidel en el sistema de 10 nodos.

Nodo	Tensión
1	1
2	0.9834297
3	0.98103067
4	0.98179909
5	0.98271492
6	0.98136102
7	0.98066614
8	0.98130814
9	0.97973732
10	0.97985485

Comparación de métodos de solución en el sistema de 10 nodos

Con el fin de realizar una comparación entre los dos métodos utilizados, en la Figura 5 se expone un diagrama con los errores en tensión del método de Gauss-Seidel tomando como base el método de Gauss-Jacobi.

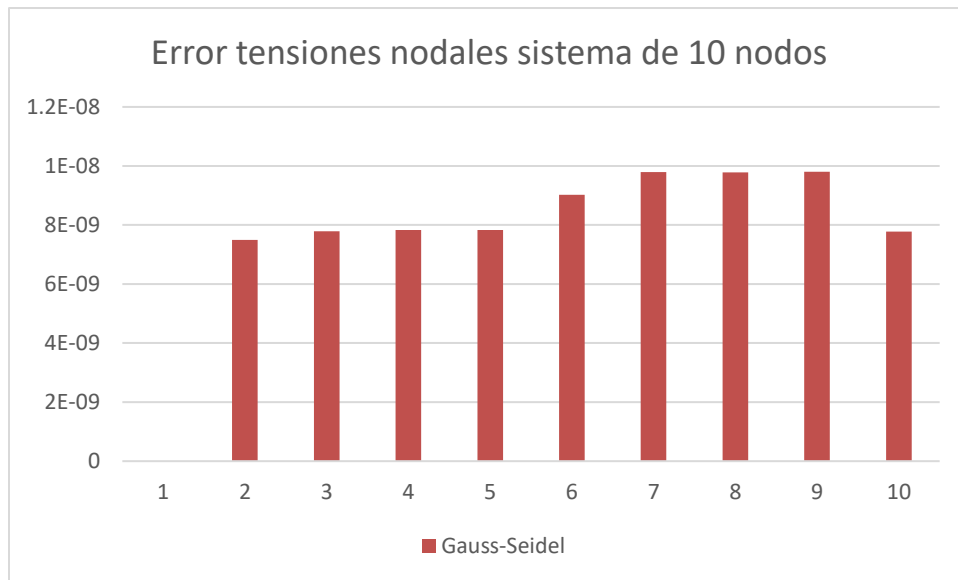


Figura 5. Error en las tensiones nodales-sistema de 10 nodos.

El error promedio utilizando el método de Gauss-Seidel es de 7.71254E-09.

El método de Gauss-Seidel converge más rápido que el de Gauss-Jacobi, siendo así que el primero es 50.88% más eficiente en término de iteraciones y un 87.06% más rápido

en término de tiempo de procesamiento y computo. Debido al error casi despreciable en respuesta y su alta eficiencia en requerimientos de procesamiento se destaca el Gauss-Seidel como una excelente herramienta para brindar solución al problema de flujo de carga.

4.4.2 Sistema de pruebas de 21 nodos:

Resultados Gauss Jacobi:

Las tensiones obtenidas haciendo uso del método de Gauss-Jacobi se presentan en la Tabla 4, donde además se provee del nodo asociado a cada tensión.

Nodo	Tensión
1	1
2	0.996276
3	0.999871
4	0.999651
5	0.999399
6	1.001484
7	1.001624
8	0.999094
9	1.007342
10	0.997448
11	0.993494
12	0.988057
13	0.994278
14	1.002291
15	1.002794
16	1.001885
17	1.005051
18	0.999129
19	1.006239
20	1.007989
21	1.007947

Tabla 4. Tensiones nodales utilizando Gauss-Jacobi

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esta simulación fue realizada basándose en los datos de la Tabla 2. Este método presenta un número de 819 iteraciones y un tiempo de computo de 0.0249 segundos, sin embargo, posee un margen de error relativamente bajo.

Resultados gauss-seidel:

Las tensiones obtenidas haciendo uso del método de Gauss-Seidel se presentan en la Tabla 5, donde además se provee del nodo asociado a cada tensión.

Tabla 5. Tensiones nodales utilizando Gauss-Jacobi

Nodo	Tensión
1	1.000000
2	0.996276
3	0.999871
4	0.999651
5	0.999399
6	1.001484
7	1.001624
8	0.999094
9	1.007342
10	0.997448
11	0.993494
12	0.988057
13	0.994278
14	1.002291
15	1.002794
16	1.001885
17	1.005051
18	0.999129
19	1.006239
20	1.007989
21	1.007947

Esta simulación fue realizada basándose en los datos de la Tabla 2. Este método presenta un número de 381 iteraciones y un tiempo de computo de 0.0163 segundos. Siendo este casi el doble de rápido tanto en número de iteraciones, así como en tiempo de computo en comparación con el anterior.

Comparación de métodos

Con el fin de realizar una comparativa entre los dos métodos utilizados, en la Figura 6 se expone un diagrama con los errores del método de Gauss-Seidel, tomando como base el método de Gauss-Jacobi.

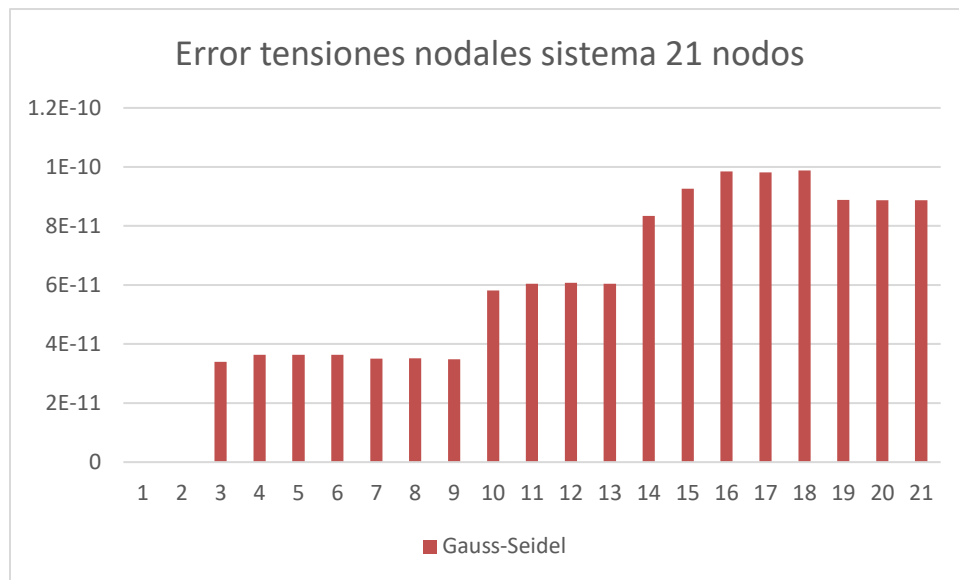


Figura 6. Error en las tensiones nodales-sistema de 21 nodos.

El error promedio utilizando el método de Gauss-Seidel es de 5,83709E-11.

El método de Gauss-Seidel converge más rápido que el de Gauss-Jacobi, siendo así que el primero es 114% más eficiente en término de iteraciones y un 52.7% más rápido en término de tiempo de procesamiento y computo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones:

Este trabajo presenta un análisis, aplicación y validación de la implementación de métodos numéricos para resolver el problema de flujo de carga en microredes de corriente continua. Para lo cual fueron seleccionados como métodos numéricos el método de Gauss-Jacobi y Gauss-Seidel, y como sistemas de pruebas se emplearon los sistemas de 10 y 21 nodos, comúnmente empleados en la literatura especializada.

Con el propósito de realizar un óptimo análisis de las MRs DC, en este producto de laboratorio se identifican cuáles son los principales parámetros y variables a analizar. Además, se hace un énfasis en la importancia de los flujos de carga en este tipo de sistemas y los criterios a considerar al momento de solucionar el problema de flujo de carga en estos sistemas.

Mediante el estudio de literatura especializada se identifica que papel cumple cada componente de la MR en el modelado del flujo de potencia, permitiendo así obtener las respectivas ecuaciones del sistema y determinar si es necesario realizar modificaciones dependiendo de las variables a analizar.

Posterior a un respectivo estudio de la literatura especializada sobre métodos de solución de flujos de carga en redes de corriente continua, se identifican los métodos numéricos con menor dificultad de implementación. Dentro de este análisis se escogen los métodos de Gauss-Jacobi y Gauss-Seidel por ser los métodos más tradicionales y confiables a la hora de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

implementarse en la solución del flujo de carga, además, su error es destacable al ser bajo en comparación con otros.

En el contexto de los sistemas eléctricos de potencia es necesario plantear escenarios de prueba para la implementación computacional de flujos de carga. Con el fin de implementar los métodos seleccionados en este trabajo se escogen dos de los sistemas más utilizados en la literatura especializada, los cuales son los sistemas de 10 y 21 nodos por su sencilla y confiable ejecución de diversos métodos.

Finalmente, después de implementar los métodos numéricos en los sistemas de prueba seleccionados, se encuentra que el método de Gauss-Seidel es aproximadamente 50% más eficiente en comparación con el método de Gauss-Jacobi tanto en el sistema de prueba de 10 nodos como en el de 21 nodos. Siendo el error de este método casi despreciable al ser comparado con el método de Gauss-Jacobi; por lo cual este producto de laboratorio recomienda su implementación para brindar solución al problema de flujo de carga en MRs DC debido al desempeño demostrado.

Recomendaciones y trabajo futuro:

Con el fin de realizar un estudio más completo de los flujos de carga en MRs, se deben tener en cuenta un mayor número de métodos y sistemas de prueba, además de realizar un análisis más exhaustivo del modelado matemático que se presenta en este.

Conociendo los parámetros, variables y criterios de una microrred DC y sabiendo aplicar diversos métodos numéricos para la solución de estos, es posible proceder al desarrollo de un estudio más avanzado de estos flujos donde el fin sea optimizar el estado operativo del sistema.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

-
- [1] L. valverde Carlos Bordonsa, Félix García-Torres, “Gestión Óptima de la Energía en MRs con Generación Renovable,” vol. 12, pp. 117–132, 2015.
- [2] D. Edmundo and O. Villalba, “Sistemas SCADA para Micro-redes con Sistemas Híbridos de Generación para Comunidades,” 2011.
- [3] A. T. Elsayed, A. A. Mohamed, and O. A. Mohammed, “DC microgrids and distribution systems: An overview,” *Electric Power Systems Research*, vol. 119. Elsevier, pp. 407–417, 01-Feb-2015.
- [4] G. A. GUTIERREZ MONSALVE, “Estudio Comparativo Sobre Metodologías De Flujo De Potencia En Sistemas De Distribucion,” vol. 1, p. 180, 2008.
- [5] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, and L. G. de Vicuna, “Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 726–736, Mar. 2009.
- [6] D. VELASCO DE LA FUENTE, “Reconfiguración de controladores para inversores fotovoltaicos con almacenamiento de energía en DC operando como generadores autónomos en una MR,” Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2012.
- [7] R. Lasseter *et al.*, “Consortium for Electric Reliability Technology Solutions White Paper on Integration of Distributed Energy Resources The CERTS MicroGrid Concept,” *Program, Transm. Reliab. Syst. Energy Program, Integr. Interes. Public Comm. Calif. Energy*, no. April, pp. 1–29, Apr. 2002.
- [8] K. S. Rajesh, S. S. Dash, R. Rajagopal, and R. Sridhar, “A review on control of ac microgrid,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, no. December 2015, pp. 814–819, 2017.
- [9] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, “AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 387–405, Aug. 2013.
- [10] M. Mokhtar, M. I. Marei, and A. A. El-Sattar, “A control scheme for islanded and grid-connected DC microgrids,” *2017 Ninet. Int. Middle East Power Syst. Conf.*, no. December, pp. 176–180, 2017.
- [11] Z. Shuai, J. Fang, F. Ning, and Z. J. Shen, “Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 3670–3682, Feb. 2018.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- [12] D. Treballe, "La generación distribuida en España," p. 163, 2006.
- [13] G. Hug-Glanzmann, "Coordination of intermittent generation with storage, demand control and conventional energy sources," in *2010 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - VIII (IREP)*, 2010, pp. 1–7.
- [14] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3. Pergamon, pp. 1513–1524, 01-Apr-2011.
- [15] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, and K. H. Kim, "Solar energy: Potential and future prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82. Pergamon, pp. 894–900, 01-Feb-2018.
- [16] G. L. T. Filho, I. F. S. dos Santos, and R. M. Barros, "Cost estimate of small hydroelectric power plants based on the aspect factor," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 229–238, Sep. 2017.
- [17] G. Köktürk and A. Tokuç, "Vision for wind energy with a smart grid in Izmir," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, pp. 332–345, Jun. 2017.
- [18] A. I. Cadena, S. Botero, C. Táuta, L. Betancur, and D. Vesga, "Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia (Conclusiones)," *Redalyc*, pp. 121–4993, 2008.
- [19] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. L. Trujillo, "Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes," *Informacion Tecnologica*, vol. 25, no. 2. Centro de Información Tecnológica, pp. 175–188, 2014.
- [20] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890–925, 2015.
- [21] C. A. S. Andrés Felipe Ríos Garcia, "Revisión del estado del arte : Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida aplicando técnicas de optimización heurísticas y metaheurísticas," 2017.
- [22] M. Est and M. Din, "Modelo estático y dinámico de carga."
- [23] GABriel Olgúin Parada, "Modelos De Carga Y Sus Efectos En Estudios," p. 70, 2013.
- [24] L. F. Grisales Noreña, B. J. Restrepo Cuestas, and F. E. Jaramillo Ramirez, "Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida: Una revisión," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 27, no. 2, pp. 157–176, 2017.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- [25] R. E. Brown, "Impact of Smart Grid on Distribution System design," in *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, PES, 2008, pp. 1–4.
- [26] I. Segura, "Evaluación del impacto de la generación distribuida en sistemas de distribución primaria de energía eléctrica," *Riunet*, p. 300, Jul. 2005.
- [27] A. Garces, "Uniqueness of the power flow solutions in low voltage direct current grids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, pp. 149–153, Oct. 2017.
- [28] W. H. Hayt Jr. and J. E. Kemmerly, "Análisis De Circuitos En Ingeniería." p. 889, 2007.
- [29] A. V. Uscategui, J. Patricio, I. Rivera, A. S. Oses, and R. A. E. González, "Desarrollo de simulador integrado de MRs inteligentes," no. 1110116, pp. 2–4, 17, 2014.
- [30] O. D. Montoya-giraldo, "Flujo de potencia óptimo para redes radiales y enmalladas empleando programación semidefinida Optimal Power Flow for radial and mesh grids using semidefinite programming," vol. 20, no. 40, pp. 29–42, 2017.
- [31] J. Grainger and W. J. Stevenson, "Análisis de Sistemas de Potencia," *Cenace, Uanl*. p. 743, 1996.
- [32] O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, D. González-Montoya, C. A. Ramos-Paja, and A. Garces, "Linear power flow formulation for low-voltage DC power grids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 163, no. July, pp. 375–381, 2018.
- [33] R. L. Burden and J. D. Faires, *Análisis numérico*. International Thomson Editores, 2002.
- [34] I. Jesús *et al.*, "Solución de sistemas de ecuaciones lineales: Métodos de Jácobi y Gauss-Seidel."

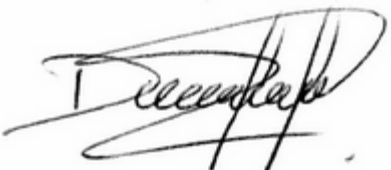
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Andrés Espejo Goetz

FIRMA ESTUDIANTE _____

*Pro Fernando Luvales W
25-01-2019 informe final*

FIRMA ASESOR _____



FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: 25/01/2019

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____