

**“ESTRATEGIA DE DECISIÓN AUTOMÁTICA BASADA EN REDES PETRI  
PARA EL CAMBIO ENTRE MODOS AISLADO-CONECTADO DE MICRO-  
REDES EN CC A REDES EN CA”**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
“ESTRATEGIA DE DECISIÓN AUTOMÁTICA BASADA EN REDES PETRI  
PARA EL CAMBIO ENTRE MODOS AISLADO-CONECTADO DE MICRO-  
REDES EN CC A REDES EN CA”**

**AUTOR:  
GONZALO FERNANDO OVIEDO SALGADO**

**DIRECTOR:  
LEONY ORTIZ MATOS**

**Quito, Julio 2021**

GONZALO FERNANDO OVIEDO SALGADO

**“ESTRATEGIA DE DECISIÓN AUTOMÁTICA BASADA EN REDES PETRI  
PARA EL CAMBIO ENTRE MODOS AISLADO-CONECTADO DE MICRO-  
REDES EN CC A REDES EN CA”**

Universidad Politécnica Salesiana

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**GONZALO FERNANDO OVIEDO SALGADO** (Y'1992) Realizó sus estudios de nivel secundario en el colegio “Técnico Salesiano Experimental Don Bosco” “Kennedy” de la ciudad de Quito, obteniendo el título de Bachiller técnico en Mecánica Industrial. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en establecer una técnica de control automática para la transición de estados (conectado desconectado) de una micro red. [goviedo@est.ups.edu.ec](mailto:goviedo@est.ups.edu.ec).

*Dirigido por:*



**LEONY ORTIZ MATOS** (Y'1982). Recibió el título de MSc. e Ingeniería en Automática por el Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella (ISPJAM) de la Universidad de Oriente, Cuba. Actualmente es candidato al título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana-Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI). Forma parte del equipo académico de la carrera de Ingeniería Eléctrica de Universidad Politécnica Salesiana Quito-Ecuador. Sus principales intereses de investigación Automatización y Control, Control robusto y Control Tolerante a Fallos, Micro-redes Eléctricas Inteligentes híbrida, CA/CC. [lortizm@ups.edu.ec](mailto:lortizm@ups.edu.ec).

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

QUITO – ECUADOR

**DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Leony Ortiz Matos, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “*ESTRATEGIA DE DECISIÓN AUTOMÁTICA BASADA EN REDES PETRI PARA EL CAMBIO ENTRE MODOS AISLADO-CONECTADO DE MICRO-REDES EN CC A REDES EN CA*” realizado por Gonzalo Fernando Oviedo Salgado, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, Julio 2021



.....  
Leony Ortiz Matos

CI: 175423038-9

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Gonzalo Fernando Oviedo Salgado, con documento de identificación N° 172311274-2, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de titulación intitulado: *“ESTRATEGIA DE DECISIÓN AUTOMÁTICA BASADA EN REDES PETRI PARA EL CAMBIO ENTRE MODOS AISLADO-CONECTADO DE MICRO-REDES EN CC A REDES EN CA”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....  
Nombre: Gonzalo Fernando Oviedo Salgado

Cédula: 172311274-2

Fecha: Julio del 2021

## INDICE GENERAL

1.	Introducción .....	2
2.	Marco teórico .....	3
2.1	Micro-Redes Híbridas En CA/CC .....	4
2.2	Conversores CC/CA/CC.....	6
3.	Control de micro-redes .....	8
3.1	Sincronización .....	8
4.	Redes Petri .....	9
5.	planteamiento del problema .....	11
6.	casos de estudio.....	12
7.	Análisis y discusión de resultados .....	14
7.1	Caso 1 análisis de transición de estados .....	14
7.2	Caso 2 análisis de la estrategia de control .....	19
7.3	Caso 3 implementación de la estrategia de control .....	20
8.	Trabajos futuros .....	21
9.	Conclusiones .....	21
10.	Referencias .....	21
11.	Estado del arte .....	25

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Micro-red Eléctrica .....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Micro-red Híbrida .....	6
Figura 3. Elementos de una Red Petri .....	10
Figura 4. Operación Paralela Transformada. ....	10
Figura 5. Diseño de Red de Petri para el control de cambio de estados .....	13
Figura 6. Sistema de 14 barras .....	14
Figura 7. Red Principal en condiciones adecuadas de funcionamiento .....	16
Figura 8. Estrategia de control ante un error en el voltaje de la Red Principal.....	17
Figura 9. Estrategia de control ante un error en la frecuencia de la Red Principal...	18
Figura 10. Estrategia de control ante un error en el ángulo de fase de la Red Principal .....	19
Figura 11. Micro Red en condiciones óptimas de funcionamiento.....	20
Figura 12. Estrategia de control ante un error en el voltaje de la Micro Red .....	22
Figura 13. Estrategia de control ante un error en la frecuencia de la Micro Red.....	23
Figura 14. Estrategia de control ante un error en el ángulo de fase de la Micro Red	24
Figura 15. Funcionamiento de la Microrred .....	24
Figura 16. Resultados de control mediante estrategia diseñada.....	25
Figura 17. Parámetros de funcionamiento de la Red Principal .....	26
Figura 18. Parámetros de funcionamiento de la Micro-red.....	27
Figura 19. Comportamiento de la estrategia de control implementada .....	28

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. expresiones de representacion matematica de redes Petri .....	10
Tabla 2. Restricciones de frecuencia.....	11
Tabla 3. Restricciones de Voltaje.....	11
Tabla 4. Restricciones de Ángulo de fase .....	12
Tabla 5. Pseudocódigo red principal en condiciones adecuadas de funcionamiento. 16	
Tabla 6. Descripción de variables red principal.....	15
Tabla 7. Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de voltaje) .....	17
Tabla 8. Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de frecuencia).....	18
Tabla 9. Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de ángulo de fase) .....	19
Tabla 10. Tiempos de cambios de estados .....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11. Descripción de variables micro-red .....	20
Tabla 12. Pseudocódigo micro-red en condiciones óptimas de funcionamiento.....	21
Tabla 13. Pseudocódigo micro-red en fallo (Desviación de voltaje).....	21
Tabla 14. Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de frecuencia).....	22
Tabla 15. Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de ángulo de fase) .....	23

# “ESTRATEGIA DE DECISIÓN AUTOMÁTICA BASADA EN REDES PETRI PARA EL CAMBIO ENTRE MODOS AISLADO-CONECTADO DE MICRO-REDES EN CC A REDES EN CA”

## Resumen

El objetivo de esta investigación es demostrar la factibilidad del empleo de las redes de Petri en el control de interconexión de Micro-redes (MR) con la red principal además de diseñar estrategias de control basadas en redes de Petri que permitan analizar de una manera más sencilla los estados del sistema. En el caso del control de cambios de estado de las Micro-redes se ha aplicado para comparar el funcionamiento tanto de la red principal como el de la MR con el fin de lograr la interconexión en los estados para los que la estrategia de control fue programada. La estrategia de control diseñada se aplica para cualquier MR que se conecte a la red principal, siendo demostrado en la aplicación al programa diseñado en Matlab Simulink del trabajo Hibrid AC/DCmicrogrid test system simulation: grid conected mode.

**Palabras Clave:** Micro-red, Red de Petri, Estrategia, Estados, Sincronismo, Tokens.

## Abstract

The objective of this research is to demonstrate the feasibility of using Petri nets to control the interconnection of Micro-networks (MR) with the main network, as well as to design control strategies based on Petri nets that allow analyzing in a more efficient way. simple system states. In the case of the control of state changes of the Micro-networks, it has been applied to compare the operation of both the main network and that of the MR in order to achieve interconnection in the states for which the control strategy was programmed. The control strategy designed is applied to any MR that is connected to the main network, being demonstrated in the application to the program designed in Matlab Simulink of the work Hibrid AC/DCmicrogrid test system simulation: grid connected mode.

**Keywords:** Micro-network, Petri net, Strategy, States, Synchronism, Tokens.

## 1. Introducción

Una Micro-red (MR) es considerada como un sistema eléctrico económicamente rentable que brinda confiabilidad y provee de grandes beneficios al compararla con las redes de servicio público, debido a que el funcionamiento de las mismas depende de recursos de energía renovable además de generación convencional [1], [2].

Al encontrarnos con un crecimiento anual del 2.5% de la demanda observamos la problemática de la gran diferencia entre demanda y generación que genera, este aumento de la demanda también ocasiona problemas de estabilidad y pérdida de potencia activa conocido como pérdida en los sistemas [1], [3].

Debido a lo mencionado últimamente se han desarrollado aspectos teóricos prácticos para el uso de diferentes tipos de fuentes de generación de energía en unas MRs tomando principal atención en los requisitos de conversión y consumo eficiente de energía en las MRs [4].

Las MRs poseen dos tipos de modos de operación, tanto conectado a red como modo isla, el modo de operación de la MR requiere del control adecuado, el control de las MRs se convierte en un requisito para una operación estable y económica eficiente. La operación estable, económica y eficiente debe ser empleadas principalmente en modelos de MRs para que faciliten la integración eficaz de los DER. El uso de los conceptos de redes Petri para el diseño de un sistema de control empleado para el cambio de modos aislado conectado de una MR es una técnica que nos ayuda a observar de una manera más sencilla el comportamiento del sistema [5]–[9].

El análisis mediante redes Petri permite hacer un seguimiento de las transiciones de los tokens de manera visual. Todo el proceso de verificación de estado se realiza dentro del mismo y solo observaremos el resultado de dicho análisis en su respectiva gráfica, las gráficas que componen las RP son 3:

lugares, tokens y transiciones, los lugares representan los estados del sistema mientras que las transiciones son las operaciones que conllevan a estos estados, los tokens representan el paso de los diferentes estados [6], [8]–[13].

La importancia del desarrollo de las MRs y su investigación radica en los cambios que está sufriendo el sistema eléctrico debido a que han migrado de ser elementos pasivos a elementos activos, con la inserción de las MRs al sistema eléctrico, observamos que estos elementos contribuyen al control de varios factores del sistema como puede ser aporte de potencia activa, compensación de voltajes entre [5]–[9].

Las funciones de control poseen varios requisitos con diferentes escalas de tiempo por lo que se requerirá una estructura de control jerárquica para la correcta activación del tipo de control que se requiere. Estas estructuras jerárquicas de control están conformadas por tres niveles, controles primarios, controles secundarios y terciarios. El control primario está encargado de mantener el voltaje y la estabilidad de frecuencia en la MR, en esta clase de control se encuentra incluido hardware de control fundamental [6], [14].

El control secundario es el encargado de compensar la tensión y las desviaciones de frecuencia causadas por la operación del control primario, entonces es que el control secundario como un control centralizado, se encarga de almacenar el voltaje y la frecuencia de la MR para compensar las desviaciones causadas por el control primario [6], [15], [16].

Mediante el análisis de las condiciones aptas para la interconexión de los sistemas desarrollaremos una estrategia de control basada en redes de Petri para el cambio de estados aislado-conectado de la MR.

En [17] es posible observar cómo los autores realizan un análisis de la pertinencia de implementación de

generación distribuida a la red principal (RP) de Colombia. Teniendo como antecedentes los índices de calidad energética del sector a implementar la MR superiores al promedio anual del país, es posible notar como la generación tradicional no es suficiente para cubrir la demanda creciente del sector a analizar. Mostrando así la importancia de la implementación de fuentes de generación distribuida.

En [18] los autores hacen un análisis de las ventajas y desventajas de la aparición de las MR en el que es posible observar la existencia de los problemas asociados a su interconexión con la RP.

La importancia de la interconexión de las MR radica en la capacidad de solucionar problemas de pérdida de potencia, suministro de energía en áreas de difícil acceso. Los principales problemas existentes en la interconexión de MR a RP radica en el control. El control de MR en aspectos de interconexión debe ser robusto.

Con la aparición de las MR para solventar los problemas de pérdidas energéticas de la RP notamos que aparece el concepto de control de estados para el cual los autores en [19] han implementado un dispositivo electrónico inteligente (IED) para el control de la interconexión, el diseño de este IED se ha sometido a normativas IEC 61000-4-30 e IEC 62586-2 el diseño modular del dispositivo es adaptable para la interconexión con inversores de sistemas fotovoltaicos además de ser un analizador de calidad de suministro.

En el concepto de interconexión de MRs a la RP es importante entender que en el caso de MRs en CC o híbridas la presencia de un inversor es vital. Los inversores dentro de los sistemas de interconexión de MR posibilitan el proceso debido a que las RP se manejan en CA.

En [20] se presenta los avances en el proyecto de interconexión de redes fotovoltaicas a la RP en zonas urbanas, en

el documento es posible notar las características de instalación de los sistemas fotovoltaicos (FV). Los inversores son el principal método de implementación e interconexión de los sistemas FV a la RP, en el documento también es posible observar los costos de implementación de los sistemas FV y la cantidad de inversores empleados para las interconexiones.

En [21] podemos observar la aplicación del sistema de control HVDC como una solución para la interconexión de las MR. En este trabajo denotan la existencia de un sistema de control jerarquizado. Siendo estos: dos controles de polos, y un control de módulo.

Uno de los estados de funcionamiento de las micro-redes es el modo isla, este modo significa que se encuentra aislado de la RP, el estar aislado de la RP implica carencia de interconexión con la misma, pero esto no significa que entre MR no puedan interconectarse.

En [22] es posible observar cómo los autores diseñan un sistema de interconexión denominado multi-agente, el sistema de interconexión multi-agente posibilita la interconexión entre MRs mientras estas se encuentran aisladas de la RP. La topología de multi-agente es importante desde el punto de vista que esta alarga la vida útil de los sistemas de almacenamiento.

## **2. Marco Teórico**

Las MR son una manera de solucionar los problemas de suministro de energía local de una manera eficiente, la Red Principal la puede observar a la MR como una fuente de alimentación o como una carga virtual.

Estas MR poseen gran cantidad de beneficios debido a su funcionamiento y de las fuentes de energía primaria que transforman para obtener energía eléctrica, la implementación de MR posee una gran cantidad de desafíos incluyendo entre estos una mayor tasa de fallas [6], [10], [23]–[26].

En la actualidad casi el 54% de la población mundial se encuentra asentada dentro de zonas urbanas, estas poblaciones se encuentran en constante crecimiento. Este crecimiento poblacional exige que la infraestructura energética en las ciudades se convierta en un factor sumamente importante, estas ciudades dependen de una red inteligente para garantizar una entrega de energía constante que garantice una sostenibilidad es decir, sin cortes de

energía, al reducir las pérdidas de transmisión y distribución [27].

Algunas MRs al poseer elementos de almacenamiento de energía son capaces de operar en dos modos, uno aislado en el que la MR produce y consume su propia energía y otro conectado, en el cual la MR aparte de generar energía también consume la energía de la RP para de esta manera poder satisfacer la demanda [6], [28], [29].

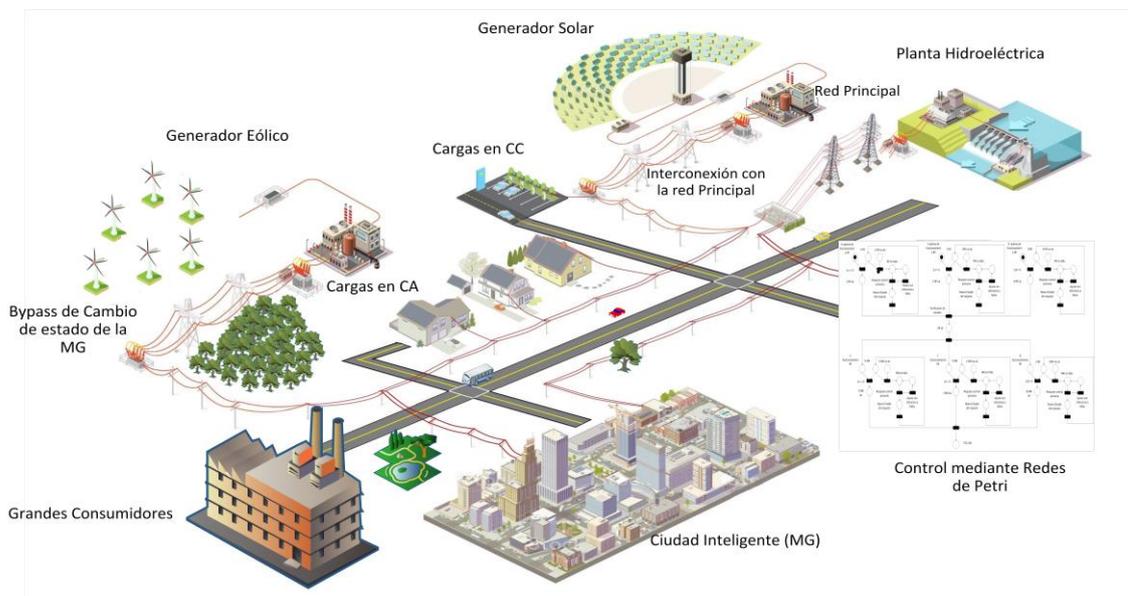


Figura 1. Micro-red Eléctrica

Estas MRs operan en baja tensión y se han convertido en una estructura base para las nuevas redes inteligentes. La RP percibe a la MR como un elemento capaz de suministrar energía a la misma y con la facultad de responder a las señales de control apropiadas, es decir, es vista por la RP como un conjunto de cargas y generadores que responden a un único sistema capaz de ser controlado, es decir, con la capacidad de conectarse o aislarse dependiendo de las condiciones de operación [29].

Una MR aparte de ser económicamente rentable y confiable, provee de grandes beneficios al compararlas con las redes de servicios públicos, esto se debe al uso de los recursos de energía renovables y a la

capacidad de transición de modos aislados-conectado [30].

Las MR han desarrollado características como instalación rápida y proximidad a la demanda, haciendo que la MR se convierta en una solución viable. Con la presencia de las MR se puede solucionar varios de los problemas existentes en los sistemas actuales como cortes de energía o fallas en la estabilidad por fallos en la RP. En una MR se emplean varios recursos de generación como células fotovoltaicas, turbinas eólicas, así como las micro turbinas o células de combustible, entre otras [31].

La intermitencia y las diferentes características de generación hacen que las MRs se coloquen en alimentadores de distribución de bajo voltaje a través de

dispositivos de almacenamiento (volante, batería y súper condensadores) y una interfaz electrónica de potencia (principalmente CC-CA, CA-CA y CA-CC). Junto con varios recursos de energía distribuida y cargas: controlables, desplazables y críticas, así como una arquitectura de control específica, forma el marco completo de MRs [5].

Considerando que las MR de bajo voltaje se han convertido de pasivas a activas y tomando en cuenta que estas se han convertido en un apoyo energético al suministrar energía a la red pública se han planteado algunos desafíos como:

- En primer lugar, las redes de bajo voltaje se están convirtiendo de pasivas a activas.
- En segundo lugar, aumente la complejidad de la implementación de los convertidores.
- En tercer lugar, los recursos de energía distribuida con diferentes atributos de generación, es decir, híbridos, CA y CC crean problemas en la regulación de voltaje y frecuencia.
- Por último, dos modos posibles de operación [32].

Es entonces, que la noción de una MR, surge para introducirse junto con los conceptos de confiabilidad y sostenibilidad mejorada, características deseadas en una MR que afectan el nivel de distribución. El control adecuado de la MR se convierte en un requisito para un modo de operación estable y económica eficiente [13], [33], [34].

El control a emplearse dependerá siempre del tipo de MR que se requiera conectar. El control es dependiente de la MR debido a que cada una de estas posee características únicas debido al tipo de generación que posee. Existiendo MRs en corriente continua (CC), MRs en corriente alterna (CA) e MRs híbridas CA/CC.

## **2.1 Micro-Redes híbridas en CA/CC**

La configuración más empleada hasta hace poco era la MR CA, pero en la actualidad las MRs en CC han ganado mucha importancia por las ventajas que estas aportan, la principal ventaja que las MRs en CC tienen es la de no poseer potencia reactiva, además de, no necesitar sincronización y poseer la capacidad de incrementar los dispositivos [35].

Es por esto que las MRs híbridas CA/CC toman un enfoque adecuado para el sincronismo por la combinación de las principales ventajas de las MRs CA y MRs CC incorporadas en una red híbrida [35].

Las MRs CA/CC híbridas se caracterizan por la coexistencia de ambos tipos de buses CA y CC, al poseer los buses en CA y CC poseen mayor adaptación y conexión de diferentes sistemas de generación y almacenamiento de energía. Las MRs híbridas brindan alta capacidad de integración de los diferentes tipos de carga existentes en el sistema. Sin embargo, en el modo isla estas MRs poseen una alta complejidad en el control, debido a la dificultad de sincronización, ya que la protección y gestión de la potencia es alta entre los dispositivos que la conforman [36], [37].

Las MRs híbridas CA/CC son sumamente interesantes debido al enfoque que guardan entorno al desarrollo de los conceptos de redes inteligentes. En la red de distribución actual, se consideran las principales ventajas de integración en la cual los dispositivos de CA o CC se encuentran conectados directamente a la red, Las MRs híbridas poseen un número muy pequeño de elementos de interfaz que reducen las etapas de conversión y así de la misma manera las pérdidas de energía. Las MRs híbridas pueden ser adecuadas para la integración de las crecientes unidades basadas en CC. Mientras tanto los dispositivos en CA se encuentran

conectados a la red en CA figura 2 [35], [38].

En la figura 2 podemos observar un claro ejemplo de una MG híbrida

conformada por dos ramales uno en CA y uno en CC interconectados a la RP mediante un convertidor y un inversor CA/CC/CA [6].

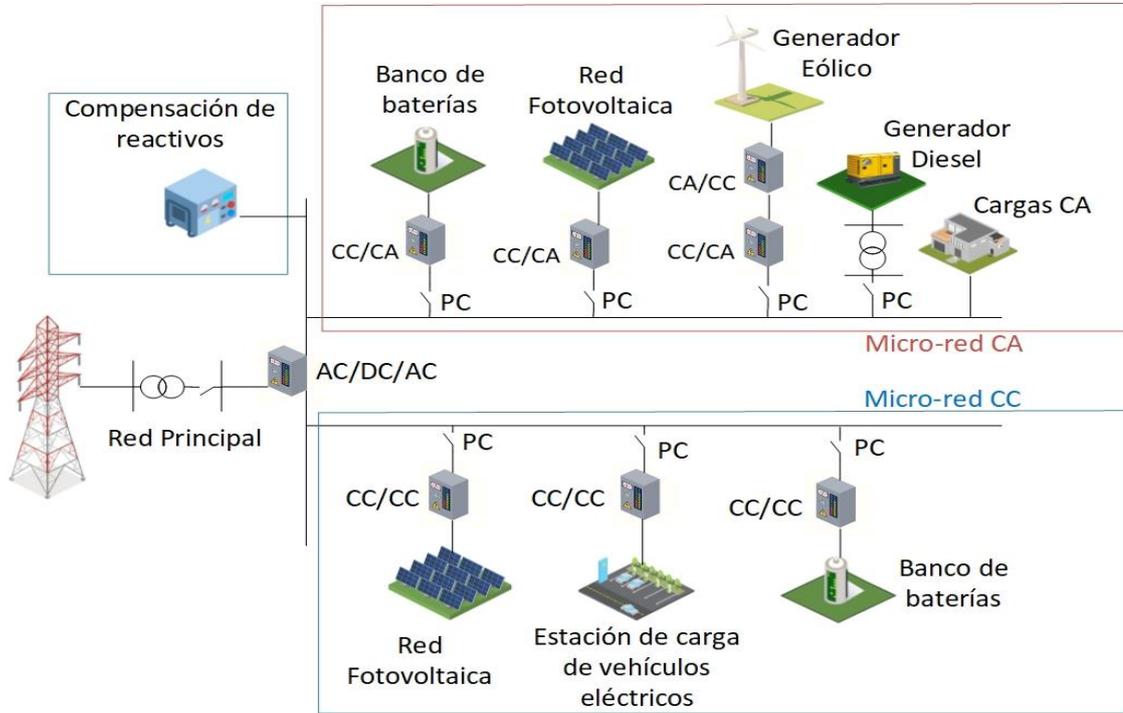


Figura 2. Micro-red Híbrida

La viabilidad económica es un concepto en el que la MR híbrida puede ser desarrollada. Mediante la adición de convertidores de potencia a la red de distribución actual y a la red de comunicación de dispositivos conectados. El costo general es más alto que el de las MRs CA, sin embargo, si la cantidad de dispositivos dentro de la MR híbrida aumenta la inversión se verá retribuida a menor tiempo a medida que se reduce el número total de convertidores de interfaz [35], [38].

Las configuraciones de las MRs dependen de la conexión a la red pública o de las etapas que estas poseen para la conversión de corriente interna, pueden existir conversión de CC a CA, CA a CC o CA/CC/CA entre otras. El cambio de estado de una MR se puede producir por: una causa obligatoria como por ejemplo

desastres naturales, por necesidad como es el caso de comunidades alejadas entre otras, en este modo la red generara la potencia internamente. Identificando de esta manera dos grupos principales:

En topologías de CA acopladas observamos que la red en CA de la MR se encuentra directamente acoplada a la red eléctrica por medio de un transformador y un convertidor CA-CC, este convertidor es empleado para la red en CC. Mientras que en CA aisladas las configuraciones deben estar compuestas mínimo por una etapa AC-DC y DC-AC, lo que implica que no existe conexión directa entre la red eléctrica y la red de CA de la MR [35], [39].

## 2.2 Conversores CC-CA-CC

Los inversores CC-CA, son elementos que permiten transformar la energía de corriente continua captada de los sistemas de generación, sistemas fotovoltaicos o la

energía entregada por los rectificadores de aerogeneradores y transformarlas en CA para poder ser transportada y aprovechada por los equipos conectados a la red ya sean de tipo doméstico como industrial [40].

Los convertidores son elementos muy costosos debido a la complejidad de los materiales empleados para su fabricación, otro factor que incrementa el costo de estos dispositivos es el índice de calidad energética, es decir, bajo contenido de armónicos entregado por los mismos. El principal problema de los convertidores económicos es que la calidad de señal entregada posee distorsiones armónicas elevadas, lo que no es conveniente para el funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos en hogares e [40]–[42].

La presencia de armónicos en la onda de salida del inversor puede elevar la temperatura de los dispositivos semiconductores y generar pérdidas de potencia en la conmutación. La presencia de altas frecuencias de armónicos introducidas a la red provocan interferencias electromagnéticas que afectan directamente a sistemas de telecomunicaciones, en el caso de presencia de armónicos en transformadores estos provocan calentamiento de los bobinados, aumento de la impedancia de fuente y pérdidas provocadas por corrientes de Foucault, en el caso de presencia de armónicos en los devanados de los motores provoca su calentamiento además de deterioro del aislamiento térmico de sus arrollamientos, por estas razones la presencia de armónicos en la onda de salida de los inversores determina una baja calidad energética suministrada por los mismos [40].

Entonces la presencia de armónicos se ve relacionada directamente con la eficiencia de los convertidores, debido al criterio de funcionamiento en el que la conversión de una señal en CC a CA pura sin pérdida de energía en el proceso, de esta manera observamos que los

convertidores de onda sinusoidal pura serán más costosos, pero a su vez mucho más seguros para equipos eléctricos y electrónicos, debido a que los convertidores de onda sinusoidal entregan mayor eficiencia en el manejo de la potencia además de bajos niveles de distorsión armónica como podemos observar en el trabajo [40].

Es necesario emplear un driver que adecúe los niveles de tensión y corriente necesarios controlando así la etapa de potencia. La topología de puente H con semiconductores de estado sólido Mosfet o IGBT especiales con capacidad de manipular niveles de tensión o corriente elevados, los semiconductores presentan una resistencia muy baja cuando se encuentran en estado on y elevada resistencia en estado off, además soportan altas velocidades de switcheo [40], [43].

La energía resultante no podría tener la forma sinusoidal debido a la presencia de alto nivel de armónicos, pero esta señal ya puede ser aprovechada y conectada ya sea a un transformador para elevar el nivel de voltaje a la salida entre 120 y 220 VCA rms o aprovechada inmediatamente. La obtención de la onda sinusoidal es lograda gracias a un filtro pasabajos LC resonante a una frecuencia calculada, esta frecuencia nos permitirá mantener la señal de referencia y eliminar cualquier contenido de frecuencia alta [43].

Los elementos que permiten el funcionamiento de los inversores son: los generadores SPWM, encargados de regular voltajes y contenidos de armónicos, varían el ancho de pulso en proporción de la amplitud de onda sinusoidal y definen la calidad de la onda de salida. El driver es el que permite la correcta activación y desactivación de los elementos semiconductores, perteneciendo a la etapa de potencia encontramos los puentes H, generalmente los Mosfet los que emplean cuatro interruptores, al poseer 4 interruptores hacemos que rama izquierda del puente tenga una frecuencia equivalente a 60 Hz

manteniendo la frecuencia de la señal moduladora, mientras que la rama de la izquierda es la que mantienen la frecuencia de la señal portadora. El transformador elevador, encargado de relacionar los dos circuitos de tensiones diferentes, la diferencia entre tensión de entrada y de salida es lograda gracias al aislamiento galvánico que este posee y a la transmisión de energía de potencia constante. Los filtros LC y FC son sumamente importantes ya que gracias a estos se obtiene una atenuación de armónicos, la atenuación de armónicos conlleva a obtener una forma de onda de salida muy parecida a la sinusoidal pura, gracias al procesamiento del filtro la señal resultante es apta para la alimentación de motores, cargas domésticas (electrodomésticos) equipos biomédicos e industriales [42]–[44].

### 3. Control de Micro-redes

En cuanto a los tipos de control: el control físico habla del control de los micro-generadores, de los sistemas de almacenamiento de energía y de la carga, El control del nivel de la red se puede ver como un tipo de combinación de estrategias de control de los diferentes micro-generadores que constituirán las distintas MRs y de los distintos sistemas acumuladores de energía como banco de baterías, para un correcto almacenamiento y una correcta inversión en el caso de ser requerido [6], [45].

Una de las técnicas de control principales es el control primario centralizado: En un modo en el cual la MR se encuentre conectada a la RP, existen varios convertidores AC-DC que permiten la operación. Determinando las frecuencias y voltajes propias de funcionamiento. Pero dada la excepción de que la MR se encuentre en un modo aislado, esta puede operar en un enfoque basado en controladores maestro-esclavo, los métodos de caída convencionales además de las diferentes estrategias de apoyo de modo

convencional  $P-f$  y métodos de caída existentes como  $Q-V$  son mayormente utilizados para regular de manera eficiente la frecuencia y el voltaje de la MR en modo isla [6], [46], [47].

Para el diseño de los sistemas de control es necesario considerar funciones como el control de estabilidad de voltaje y frecuencia, además de la capacidad Plug and Play de las fuentes de energía de origen renovable, la compensación de las desviaciones del voltaje y frecuencia presentes gracias al control primario, eléctrico, térmico y la sincronización con la RP [6].

Las MRs poseen características inherentes diferentes como: el alto grado de desequilibrio además de diferentes unidades de generación distribuida. La complejidad de las MRS nos da grandes desafíos en el diseño de estrategias de control para cada uno de los escenarios de operación de las mismas. Las estrategias de control para modos isleños e interconectados son diferentes para cada caso, por ejemplo para el modo de operación conectado a la RP todas las unidades de generación pueden funcionar en modo de control PQ, caso contrario en el modo isla el conjunto de fuentes de generación deberá trabajar específicamente en el modo de control de voltaje [6], [48], [49].

#### 3.1 Sincronización

La señal fuente toma un papel primordial para el cambio de estado de aislado a conectado a la red sin problemas. La fuente de formación de red es la encargada de ajustar voltaje y frecuencia de salida para de esta manera cumplir con criterios de reconexión (diferencias de voltajes, frecuencias, ángulo de fase entre el voltaje de la red y el voltaje de la MR), de esta manera se puede reconectar la MR a la RP con transitorios suaves [50].

La estrategia más empleada para el paso de estado de conectado a la red a aislado con el fin de tener una desconexión suave es el de tener potencia

activa y reactiva en cero durante la desconexión. Al tener la señal fuente aun funcionando en el momento de cambio de estado se podría presentar un salto de fase si no se emplea una técnica de control de sincronización, causando transitorios dañinos en voltaje y corriente. Por lo que un punto de análisis primordial es la sincronización entre voltaje de la MR y el voltaje de la señal fuente [50].

En [50] los autores presentan un control de sincronismo integrado con la facultad de suavizar el cambio de ángulo de un inversor de formación de red, el que funcionará dentro de una MR.

La conexión de MRs al sistema trae consigo la problemática de la sincronización, para la cual los autores en [51] se han basado en el protocolo de sincronización de tiempo de precisión IEEE1588 el que es aplicable para mejorar la precisión de sincronización del sistema de comunicación Ethernet de la MR a nanosegundos.

Por lo general las estrategias de control de sincronización tienen dos partes, una la técnica de detención de fase y dos el algoritmo de control de sincronización. Los bucles de bloqueo de fase (PLL) es una de las técnicas más utilizadas para la detección de fase para detectar el ángulo de fase de una señal. En el caso del algoritmo de control de sincronización el, algoritmo de caída es el que presenta mayor interés de estudio, se ha empleado un control de caída para controlar MR en la misma red, logrando producir potencias activa y reactiva con una porción adecuada para las capacidades de cada MR [52].

Los autores en [52] presentan una propuesta para el control de sincronización en la reconexión perfecta de MR, utilizando una red de distribución trifásica como una MR con el fin de sincronizarla con la RP.

#### **4. Redes Petri**

El concepto de redes Petri “RP” fue conocido por primera vez en la tesis

doctoral de Carl Adam Petri. Siendo una herramienta gráfica matemática de modelado empleada para la descripción formal de sistemas con dinámica caracterizada por concurrencia, sincronización, exclusión mutua y conflictos, características típicas de sistemas distribuidos [53]–[55].

Este modelado mediante RP posee dos características primordiales: la primera es que nos permite visualizar comportamientos como ocurrencia, paralelismo, sincronización y recursos compartidos, la segunda es que los métodos de análisis de redes Petri son muchos. Este concepto de RP se ha desarrollado durante años debido a que existen varias clases de RP definidas [56].

Las RP están definidas como herramientas de naturaleza gráfica empleadas para el diseño y análisis de sistemas dinámicos de eventos discretos, estas RP se representan gráficamente por un grafo dirigido bipartido. Dentro de su estructura encontramos tres elementos primordiales y sus correspondientes variables y propiedades: Los lugares que son elementos que representan los estados de los elementos del sistema, estos se encuentran representados por círculos, las transiciones son elementos representados por barras y las marcas o Tokens representado una distribución en los lugares denominados marcas, estas marcas son representadas por lo general por un punto en el interior del círculo que define el lugar que la contiene [53], [54], [57].

Dentro del modelado de las RP observamos que los lugares y transiciones se conectan por arcos dirigidos, por ejemplo, un lugar  $P_i$  posee un arco dirigido a una transición  $T_j$ , esta disposición define el lugar de entrada de la transición, al tener múltiples entradas a una transición estas son indicadas por múltiples arcos desde el lugar de entrada hacia la transición, por otra parte la representación de una salida se la denota

por un arco que se dirige desde una transición hacia un lugar [53].

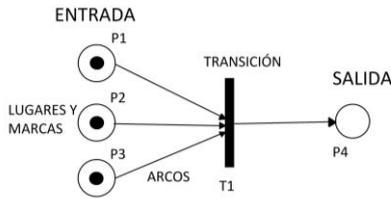


Figura 3. Elementos de una Red Petri.

Dentro de las propiedades de las redes Petri debemos denotar que la alcanzabilidad consiste en que cada uno de los disparos de una transición habilitada modificará la distribución de los marcados dentro de la red. El que sea limitable implica que el número de marcas de la red perteneciente a cada lugar no excede el número finito para cualquier marcado alcanzable, será viva siempre que sin importar que marcador se ha alcanzado siempre será posible una nueva secuencia  $\sigma$  de disparos además es reversible siempre que sea posible alcanzar nuevamente el marcado inicial o estado inicial del sistema [13], [56].

La estructura matemática de una RP es una definición formal de las mismas y está dada por [4], [53]:

$$PN = (P, T, F, W, M_0) \quad (1)$$

Donde:

Tabla 1. expresiones de representación matemática de redes Petri

Expresión	Representa
$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$	conjunto finito de lugares.
$T = \{t_1, t_2, \dots, t_r\}$	conjunto finito de transiciones.
$F \subseteq (PxT) \cup (TxP)$	conjunto de arcos.
$W: F \rightarrow \{1,2,3,4 \dots\}$	función de peso.
$M_0: P \rightarrow N: \{0,1,2,3,4 \dots\}$	marca inicial.

$P \cap T = \phi$  y  $P \cup T = \phi$  función de entrada

$I: PxT \rightarrow N$  arcos directos de lugares a transiciones

$O: PxT \rightarrow N$  arcos directos desde las transiciones hacia lugares

La estructura básica del modelo de una RP está representada por gráficos que representan lugares (P), arcos y transiciones (T) con un estado inicial llamado marca ( $\mu_0$ ), el conjunto de lugares es representado por círculos que representan sistemas y estados. Las transiciones son representadas mediante barras y estas representan los eventos que modifican el estado del sistema, figura 4 [13].

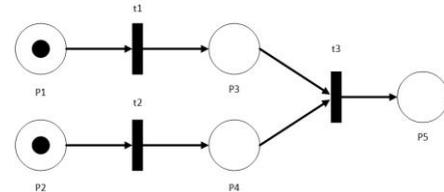


Figura 4. Operación Paralela Transformada.

Donde:

$$\begin{aligned}
 P &= \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}; T = \{t_1, t_2, t_3\}; \\
 I &= (p_1, t_1) = 1; \\
 I &= (p_2, t_1) = 0; I = (p_2, t_2) = 1; \\
 I &= (p_2, t_1) = 0; \\
 I &= (p_3, t_3) = 1; I = (p_4, t_3) = 1; \\
 O &= (t_1, p_3) = 1; \\
 O &= (t_1, p_4) = 0; O = (t_2, p_4) = 1; \\
 O &= (t_2, p_3) = 0; \\
 O &= (t_3, p_5) = 1; M_0 = (1,1,0);
 \end{aligned}$$

Una de las formas de representación de RP es la forma matricial, esta matriz es conocida como matriz de incidencia C y sus dimensiones están definidas por el número de lugares (P) representados en las filas y por el número de transiciones (T) correspondientes a las columnas [13].

$$C(P, T) = \begin{bmatrix} -W(p; t) & \text{if } f(p, t) \in F \\ +W(t; p) & \text{if } f(t, p) \in F \\ 0 & \text{de otra manera} \end{bmatrix}$$

Donde:

F corresponde a la relación de flujo existente entre P y T, W (p, t) corresponde al peso del arco existente del lugar a la transición y (p, t)  $\in$  F representa que no existe flujo de p a t [13].

La matriz de incidencia Cesta dada por la expresión:

$$C(p, t) = W(t, p) - W(p, t)$$

Siendo W(p,t) la matriz de incidencia de entrada, y W(t,p) la matriz de incidencia de salida. La matriz de incidencia brinda información sobre el número de marcas que ocurren en los lugares al momento de realizar las transiciones [13].

## 5. Planteamiento del problema

La correcta sincronización de una MR debe sujetarse a las variables de funcionamiento de la RP, siendo estas la frecuencia, el ángulo de fase y el voltaje, además la secuencia, la que no toma principal enfoque en el análisis de la conexión de la MR debido a que es un factor constructivo que no puede variar con el cambio de estado de la MR.

IEEE std 1547 fue desarrollado para brindar una guía con los aspectos técnicos y una bibliografía que nos brinda datos específicos sobre los requisitos de las variables para la correcta interconexión de las MRs con la RP [58].

Para el sincronismo de la MR es importante que la fluctuación del voltaje no sea mayor al  $\pm 5\%$  del valor del voltaje predominante del sistema, además que cada uno de las MRs conectadas debe poseer un sistema de monitoreo para obtener la información correspondiente del estado de la conexión. Es importante que el dispositivo de conexión en paralelo del sistema de interconexión debe ser capaz de soportar el 100% más de la interconexión o voltaje nominal del sistema [58].

Para una correcta sincronización de una MR a una RP observamos que las variables principales a ser analizadas son la frecuencia, el voltaje y el ángulo de fase, las que deben estar dentro de un rango específico para que la sincronización pueda dar paso a la interconexión [58].

Siendo estos parámetros [52], [58]:

En la tabla 2 podemos observar que para potencias entre 0 a 500 kVA el error de frecuencia debe ser equivalente al 0.3 %, al incrementar los niveles de potencia entre 500 a 1500 kVA observamos que el error en la frecuencia ha disminuido al 0.2 %, para valores de potencia superiores a los 1500 kVA el error de frecuencia se ha reducido al 0.1 %.

**Tabla 2.** Restricciones de frecuencia

Niveles de Potencia de la MR agregada (kVA)	Diferencia de frecuencia ( $\Delta f$ Hz)
0-500	0.3
>500-1500	0.2
>1500-10000	0.1

En la tabla 3 podemos observar que para potencias entre 0 a 500 kVA el error de Voltaje debe ser equivalente al 10 %, al incrementar los niveles de potencia entre 500 a 1500 kVA observamos que el error en el voltaje ha disminuido al 5 %, para valores de potencia superiores a los 1500 kVA el error en el voltaje se ha reducido al 3 %.

**Tabla 3.** Restricciones de Voltaje.

Niveles de Potencia de la MR agregada (kVA)	Diferencia de voltaje ( $\Delta V$ %)
0-500	10
>500-1500	5
>1500-10000	3

En la tabla 3 podemos observar que para potencias entre 0 a 500 kVA el error del ángulo de fase debe ser equivalente a 20°, al incrementar los niveles de potencia entre 500 a 1500 kVA

observamos que el error en el ángulo de fase ha disminuido a  $15^\circ$ , para valores de potencia superiores a los 1500 kVA el error en el ángulo de fase se ha reducido a  $10^\circ$ .

**Tabla 4.** Restricciones de Ángulo de fase

<i>Niveles de Potencia de la MR agregada (kVA)</i>	<i>Diferencia del ángulo de fase (<math>\Delta\Phi^\circ</math>)</i>
0-500	20
>500-1500	15
>1500-10000	10

En la figura 5 podemos observar el diseño de la red de Petri que se encargará de realizar el control de conexión y desconexión de nuestra micro red con la RP. Para tomar la decisión de control empleamos un mecanismo de comparación que nos informa del estado de cada una de las variables de todo el sistema, en el caso de la RP contamos con un token inicial en V óptimo de funcionamiento de RP al igual que en f de funcionamiento de RP y  $\theta$  de funcionamiento de RP, este token nos indica que poseemos valores de referencia de funcionamiento de la RP, a los que después de la lectura de los datos de funcionamiento de la misma se realiza la comparación esperando a obtener un error lo más cercano de cero.

De esta manera una vez realizada la comparación de las variables de funcionamiento de la RP con los valores de funcionamiento los tokens iniciales pasan a un nuevo estado, por ejemplo: en el caso del voltaje, el nuevo estado se denomina V RP ok, de la misma manera en el caso de la frecuencia y el ángulo de fase, tomando los nombres de f RP ok y  $\theta$  RP ok. De manera simultánea los tokens que confirman el estado ok de las variables pasarán a la verificación de estados la que solo actuará al recibir 3 tokens correspondientes a RP ok, f RP ok,  $\theta$  RP ok, solo de esta manera confirmará el estado ok de la RP.

La falta de uno de estos tokens indicará que la RP se encuentra en fallo, actuando así los estados V RP no ok, f RP no ok,  $\theta$

RP no ok según corresponda a la falla, con lo cual el token que indica el problema pasará al estado de RP en fallo, así la estrategia de control indica que se debe activar el control primario, al ser corregido el error el lazo enviará el token a V RP, f RP o  $\theta$  RP indicando que el problema se ha corregido, caso contrario actuará hasta 2 veces más y al no haber corregido el error pasará a un estado denominado Ajuste con tolerancia a Fallos para después pasar a la verificación de la MR.

Al obtener el estado RP ok este pasará tres tokens uno a V funcionamiento RP, otro a f funcionamiento RP y el tercero a  $\theta$  funcionamiento RP, indicando de esta manera que las variables de funcionamiento de la RP son a las que las variables de la MR deberán ajustarse para un correcto sincronismo.

Así de esta manera la red de Petri pasará a la toma de lectura de las variables de funcionamiento de la MR y posteriormente a la comparación de estas variables con las de la RP, esperando de esta manera obtener un error lo más parecido a cero, al obtener este error la red de Petri tomara como un funcionamiento adecuado de la MR pasando un token a V MR ok, f MR ok,  $\theta$  MR ok respectivamente, indicando de esta manera que la MR es apta para el sincronismo. Caso contrario al no haber recibido un token cualquiera de las variables de funcionamiento de la MR (V MR, f MR,  $\theta$  MR) la red de Petri lo tomará como un fallo del sistema y habrá recibido uno o más tokens según corresponda el fallo en los estados: V MR no ok, f MR no ok,  $\theta$  MR no ok con lo que iniciara el lazo de reajuste de los valores de las variables de la MR iniciando por un reajuste por control primario pasando a un nuevo estado de la MR, el que si corrigió el error pasara un token a la

variable donde se aplicó el reajuste caso contrario realizara la acción de corrección durante dos veces más para posteriormente pasar al estado de Ajuste con Tolerancia de Fallo.

Al haber realizado todo este proceso de lectura y de ajuste de las variables tanto de la RP como de la MR la red Petri nos indica un estado de funcionamiento ok del sistema con lo que el ultimo token pasara hacia el estado PCC on, lo que nos indica que el sistema está listo para la sincronización u puede realizarse la interconexión entre las mismas.

Mediante el uso del software VisObjNet se diseñó el sistema de control basado en redes de Petri, esta estrategia se

diseñara de tal manera que al recibir los datos de funcionamiento de la Rp y de la MR ubique los toquen en el lugar correspondiente al estado del sistema, posteriormente realizara el análisis de estados dando paso a la acción de control correspondiente para el estado en el que tanto la RP como la MR se encuentra, la estrategia de control posera 3 acciones: la primera en el caso de que el funcionamiento del sistema sea correcto PCC on, la segunda es el caso en el que el sistema se encuentre el fallo RCP, y la tercera en el caso de que el RCP no logre ajustar el sistema a las condiciones óptimas de trabajo ATF.

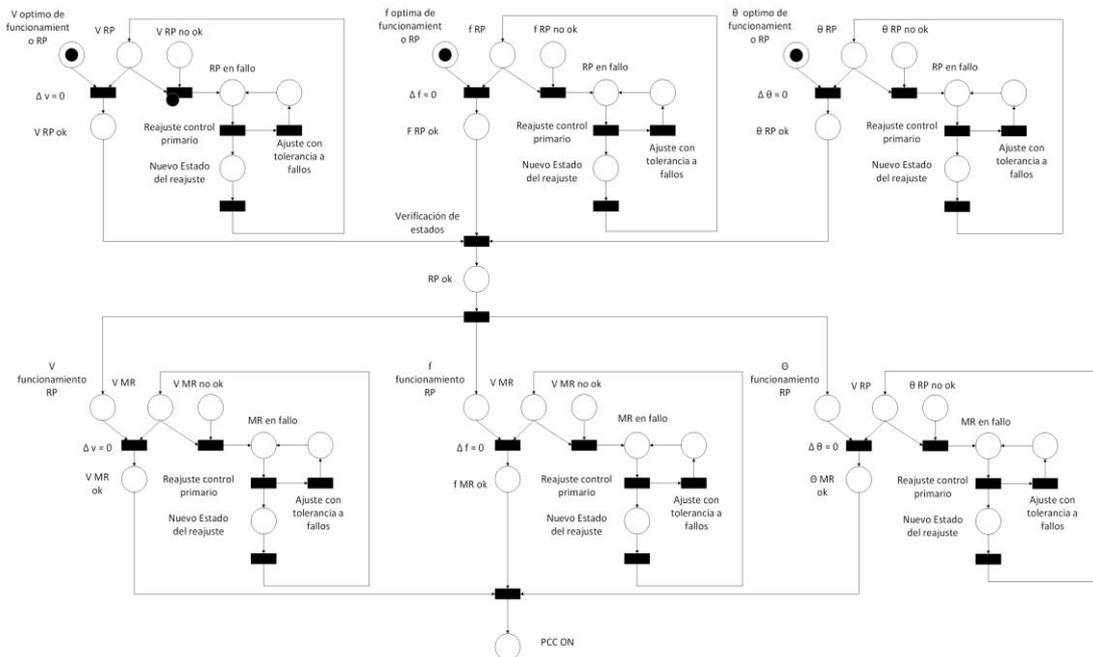


Figura 5. Diseño de Red de Petri para el control de cambio de estados

Empleando el software Matlab con la librería GPenSim se realizará el análisis del funcionamiento de la estrategia de control, este análisis nos demostrara el flujo de los toquen y el estado final dependiendo de los distintos problemas que se pueden presentar en el sistema. Empleando el software Matlab Simulink aplicaremos la estrategia de control al sistema del documento Hibrid AC/DCmicrogrid test system simulation: grid conected mode [2].

## 6. Caso de estudio

En el caso de estudio se plantea una MR CC que debe ser conectada a una red de distribución en CA/CC/CA, la MR en estudio está conformada por un sistema Solar fotovoltaico, cargas lineales y un sistema de almacenamiento compuesto por un banco de baterías (BESS), y para su interconexión la MR posee convertidores electrónicos de voltaje (maestro -esclavo) los que se encargara

de adecuar la señal para el paso automático de la MR de estado aislado a conectado o viceversa.

El sistema principal al que se conectara la MR CC es uno de 14 barras, en el que: posee un equivalente de Thévenin de 100 MVA con una relación X/R de 10, posee dos niveles de distribución de voltaje de distribución, el voltaje del primario es 13.8 kV, el voltaje en el secundario es 220 V, posee 3 sub MR la primera es una CA MR conectada al nivel de 220 V la que opera con un generador Diesel y proporciona energía a

4 cargas, la segunda es una CA MR que opera con un sistema fotovoltaico (PV) y un banco de baterías (BESS) y la tercera es una barra colectora de CC comprendida por un sistema PV y BESS, Funciona a una frecuencia de 60 Hz, esta CA/CC MR también incluye un generador Diesel y un sistema equivalente a la RP con cargas lineales y no lineales. Este sistema se encuentra más detallado en el trabajo científico Hybrid AC/DC test system simulation: gridconnected mode, figura 6 [2].

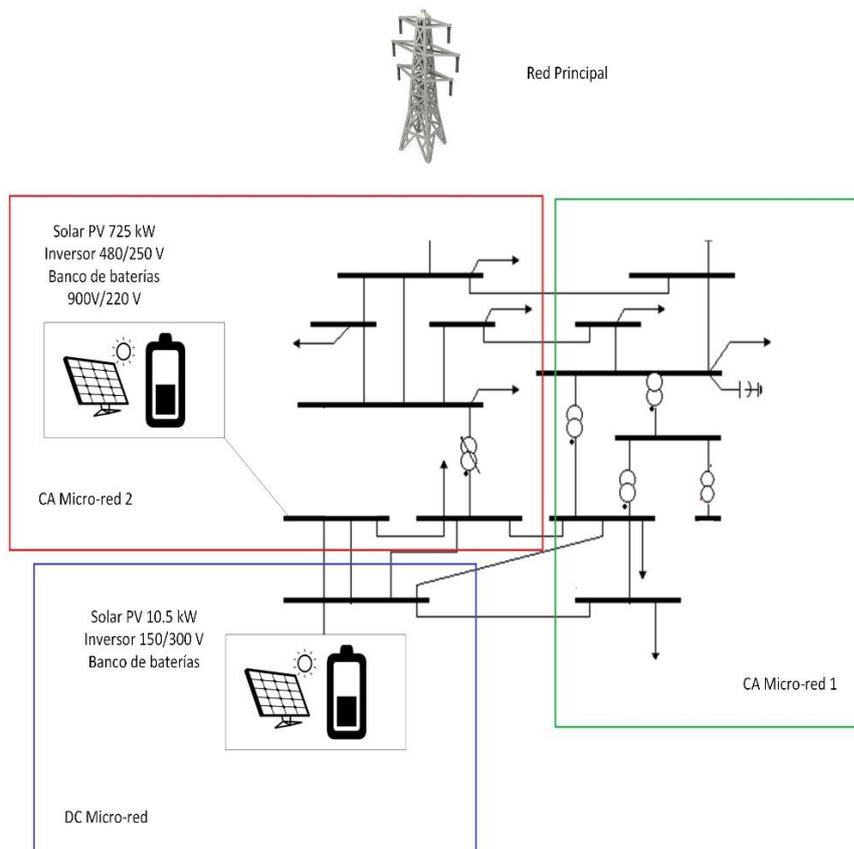


Figura 6. Sistema de 14 barras

## 7. Análisis y Discusión de Resultados

### 7.1 Caso 1 análisis de transición de estados

En el diseño de nuestra red de Petri aplicamos como un método de control la

adquisición de datos de funcionamiento tanto de la RP como de la micro red. Estos datos son comparados para determinar los estados de nuestros dos sistemas, por ejemplo, en el caso de que uno de los datos obtenidos de la RP no cumpla los parámetros establecidos de funcionamiento la red de Petri tomará como un fallo y dará paso a un reajuste

mediante el controlador. Para una mejor comprensión se han realizado graficas del funcionamiento de la red de Petri para cada uno de los casos mencionados anteriormente.

**Tabla 5.** Descripción de variables red principal

Nombre	INTERPRETACIÓN
$e$	Error.
$C_l$	Ciclos de funcionamiento.
$V_{ODF}$	Voltaje óptimo de funcionamiento.
$f_{ODF}$	Frecuencia optima de funcionamiento.
$tita_{ODF}$	Tita de funcionamiento.
$T_O$	Tokens
$V_{RP}$	Voltaje red principal.
$f_{RP}$	Frecuencia red principal.
$tita_{RP}$	Tita red principal.
$V_{ok}$	Voltaje en funcionamiento correcto (ok).
$f_{ok}$	Frecuencia en funcionamiento correcto (ok).
$tita_{ok}$	Tita en funcionamiento correcto (ok).
$RP_{ok}$	Red principal en funcionamiento correcto (ok).
$RP_{fallo}$	Red principal en fallo.
$V_{RP\sim ok}$	Voltaje red principal en funcionamiento incorrecto.
$RP_{RCP}$	Reajuste control primario de la red principal.
$f_{RP\sim ok}$	Frecuencia red principal en funcionamiento incorrecto.
$tita_{RP\sim ok}$	Tita red principal en funcionamiento incorrecto.
$V_{FRP}$	Voltaje funcionamiento red principal.
$f_{FRP}$	Frecuencia funcionamiento red principal.
$tita_{FRP}$	Tita funcionamiento red principal.

En la figura 7 podemos observar la forma en la que los lugares: V óptimo de funcionamiento, f óptimo de

funcionamiento y tita óptimo de funcionamiento entregan tokens automáticamente debido a que estos lugares poseen la información de valores de funcionamiento adecuados para la correcta operación de la RP, mientras que  $V_{RP}$ ,  $f_{RP}$ ,  $tita_{RP}$  obtendrán tokens al realizar las lecturas de las variables de funcionamiento de la RP.

En esta primera grafica poseemos 6 tokens, debido a que tenemos 3 lugares que corresponden a datos de funcionamiento óptimos de la RP que en este caso nos sirven como referencia para la comparación con las variables reales de funcionamiento de la RP, estas variables reales de funcionamiento serian representadas con 3 lugares más, completando de esta manera los 6 tokens ilustrados en la gráfica.

También podemos observar cómo V óptimo de funcionamiento, f óptimo de funcionamiento y tita óptimo de funcionamiento entregan los tokens al mismo tiempo que  $V_{RP}$ ,  $f_{RP}$ ,  $tita_{RP}$  para de que de esta manera estos tokens puedan pasar a  $V_{ok}$ ,  $f_{ok}$ ,  $tita_{ok}$  confirmando así que el error entre las variables de V, f y tita óptimos de funcionamiento y variables V, f y tita reales de funcionamiento es lo más parecido a cero, dando paso a que tokens pasen a un lugar conocido como  $RP_{ok}$  el que nos indica que la RP se encuentra en condiciones adecuadas para sincronismo.

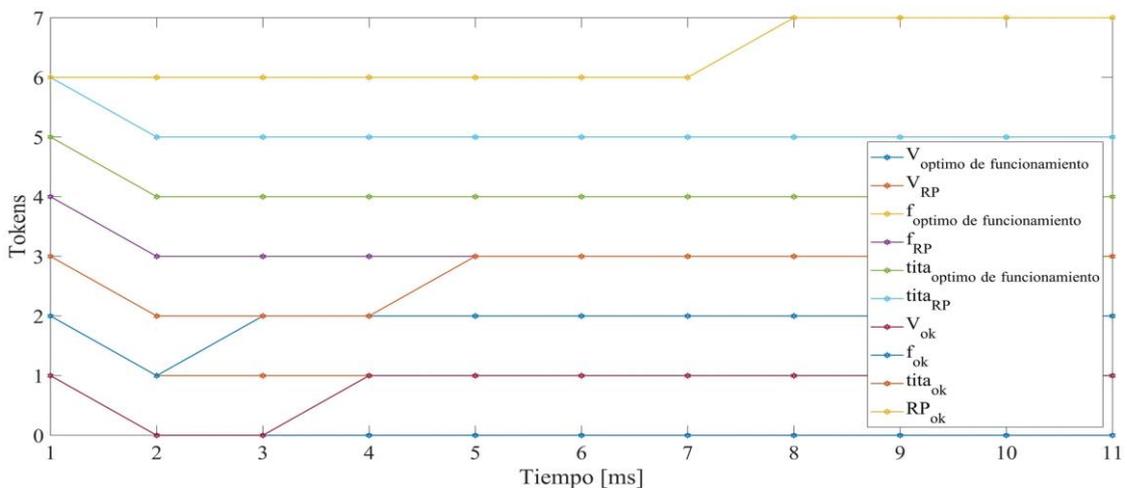
En la figura 7 podemos observar la forma en la que los lugares: V óptimo de funcionamiento, f óptimo de funcionamiento y tita óptimo de funcionamiento entregan tokens automáticamente debido a que estos lugares poseen la información de valores de funcionamiento adecuados para la correcta operación de la RP, mientras que  $V_{RP}$ ,  $f_{RP}$ ,  $tita_{RP}$  obtendrán tokens al realizar las lecturas de las variables de funcionamiento de la RP.

En esta primera grafica poseemos 6 tokens, debido a que tenemos 3 lugares que corresponden a datos de

funcionamiento óptimos de la RP que en este caso nos sirven como referencia para la comparación con las variables reales de funcionamiento de la RP, estas variables reales de funcionamiento serian representadas con 3 lugares más, completando de esta manera los 6 tokens ilustrados en la gráfica. También podemos observar cómo V óptimo de funcionamiento, f óptimo de funcionamiento y tita óptimo de funcionamiento entregan los tokens al mismo tiempo que  $V_{RP}, f_{RP}, tita_{RP}$  para de que de esta manera estos tokens puedan pasar a  $V_{ok}, f_{ok}, tita_{ok}$  confirmando así que el error entre las variables de V, f y tita óptimos de reales funcionamiento y variables V, f y tita de funcionamiento es lo más parecido a cero, dando paso a que tokens pasen a un lugar conocido como  $RP_{ok}$  el que nos indica que la RP se encuentra en condiciones adecuadas para sincronismo.

**Tabla 6.** Pseudocódigo red principal en condiciones adecuadas de funcionamiento

	<b>ENTRADAS:</b> $V_{ODF}, f_{ODF}, tita_{ODF}, V_{RP}, f_{RP}, tita_{RP}, V_{ok}, f_{ok}, tita_{ok}$
<b>Paso 1:</b>	
<b>Paso 2:</b>	<b>Salidas:</b> $T_{O1}, T_{O2}, T_{O3}, T_{O4}, T_{O5}, T_{O6}, RP_{ok}$
	<b>Inicialización:</b>
	$T_{O1} = 1$
	$T_{O2} = 1$
	$T_{O3} = 1$
<b>Paso 3:</b>	$V_{ODF} = 1$
	$f_{ODF} = 1$
	$tita_{ODF} = 1$
	$V_{RP} = 0$
	$f_{RP} = 0$
	$tita_{RP} = 0$
	Si $(V_{ODF}, f_{ODF}, tita_{ODF}) = 1$
	y $(V_{RP}, f_{RP}, tita_{RP}) = 1$
	Entonces
	$e \cong 0$
<b>Paso 4:</b>	$T_{O4} = 1$
	$T_{O5} = 1$
	$T_{O6} = 1$
	$RP_{ok} = 1$
<b>Paso 5:</b>	<b>Retornar:</b> $V_{RP}, f_{RP}, tita_{RP}$



**Figura 7.** Red Principal en condiciones adecuadas de funcionamiento

- Red Principal en fallo (Desviación de voltaje)

En la figura 8 observamos el comportamiento de la Red de Petri en

presencia de un fallo en el voltaje, este fallo en el voltaje representa un problema que debe ser solucionado para la interconexión de la MR con la RP. En el grafico podemos observar cómo V

óptimo de funcionamiento entrega su token, mientras que se ha colocado un token en  $V_{RP\ no\ ok}$  esto se debe a que la comparación entre estas variables nos ha dado un valor demasiado alejado de 0 indicándonos que la RP no está apta para interconexión.

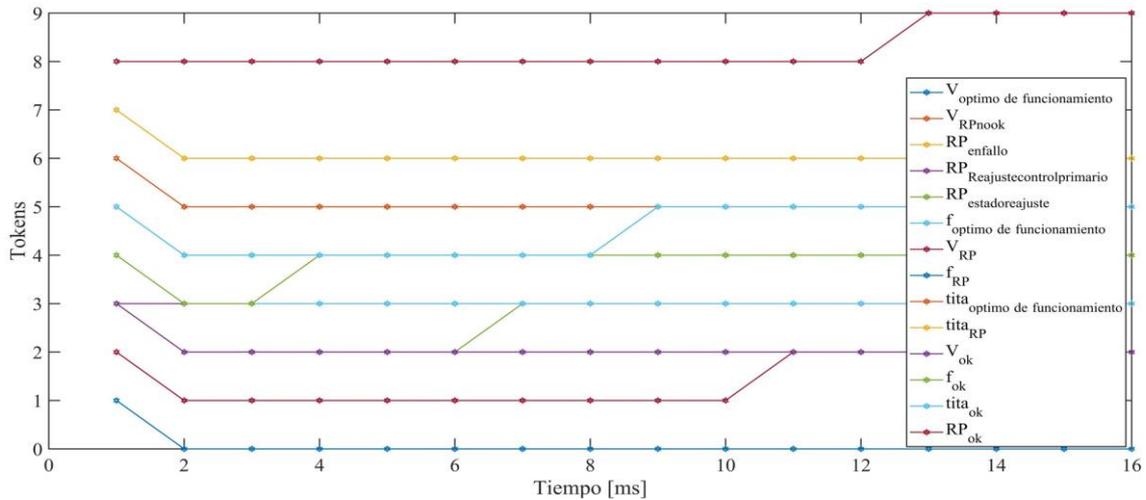
Al recibir un token el lugar  $V_{RP\ no\ ok}$  inmediatamente lo pasa al siguiente lugar denominado  $RP_{en\ fallo}$  el que nos indica sobre el problema, el estado de la RP se encuentra en fallo por lo que este token pasa al lugar denominado  $RP_{Reajustecontrolprimario}$  que indica que se ha activado el ajuste mediante control primario, este estado se ha programado para que al no ser corregido el problema se ejecute durante dos ciclos mas y si el fallo persiste pasar al estado ajuste con tolerancia a fallos. Al ser corregido el problema el token inmediatamente pasa a  $V_{RP}$  para que se realice la comparación de las variables de funcionamiento de la RP con las variables óptimas de funcionamiento.

Al haber corregido el problema nos encontraremos en el caso anteriormente

mencionado (Red Principal en condiciones óptimas de funcionamiento) y el proceso de verificación de variables nos llevará al estado de  $RP_{ok}$  al obtener los tokens procedentes de  $V_{RP\ ok}$ ,  $f_{RP\ ok}$ ,  $tita_{RP\ ok}$ .

**Tabla 7.** Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de voltaje)

<b>Paso 1:</b>	<b>Entradas:</b> $V_{ODF}$ , $V_{RP\sim ok}$ , $V_{RP}$ , $f_{RP}$
<b>Paso 2:</b>	<b>Salidas:</b> $T_{O1}$ , $T_{O2}$ , $T_{O3}$ , $RP_{ok}$ , $RP_{fallo}$ , $RP_{RCP}$
	<b>Inicialización:</b> $T_{O1} = 0$ $T_{O2} = 0$ $T_{O3} = 0$
<b>Paso 3:</b>	$V_{ODF} = 1$ $V_{RP} = 0$ $f_{RP} = 0$ $tita_{RP} = 0$ $Si (V_{ODF} de T_{O1}) = 0 y$ $(V_{RP\sim ok} de T_{O2}) = 1$ $Espere C_l = 2$
<b>Paso 4:</b>	<i>Entonces</i> $(V_{RP} de T_{O3}) = 1$ $RP_{ok} = 1$
<b>Paso 5:</b>	<b>Retornar:</b> $V_{RP}$ , $f_{RP}$ , $tita_{RP}$



**Figura 8.** Estrategia de control ante un error en el voltaje de la Red Principal

- Red Principal en fallo (Desviación de frecuencia)

En la figura 9 observamos el comportamiento de la Red de Petri en presencia de un fallo en la frecuencia, este fallo en la frecuencia representa un

problema que debe ser solucionado para la interconexión de la MR con la RP. En el gráfico podemos observar cómo  $f$  de funcionamiento entrega su token, mientras que se ha colocado un token en  $V_{RP\ no\ ok}$  esto se debe a que la

comparación entre estas variables nos ha dado un valor demasiado alejado de 0 indicándonos que la RP no está apta para interconexión.

Al recibir un token el lugar  $f_{RP\ no\ ok}$  inmediatamente lo pasa al siguiente lugar denominado  $RP_{en\ fallo}$  el que nos indica sobre el problema, el estado de la RP se encuentra en fallo por lo que este token pasa al lugar denominado

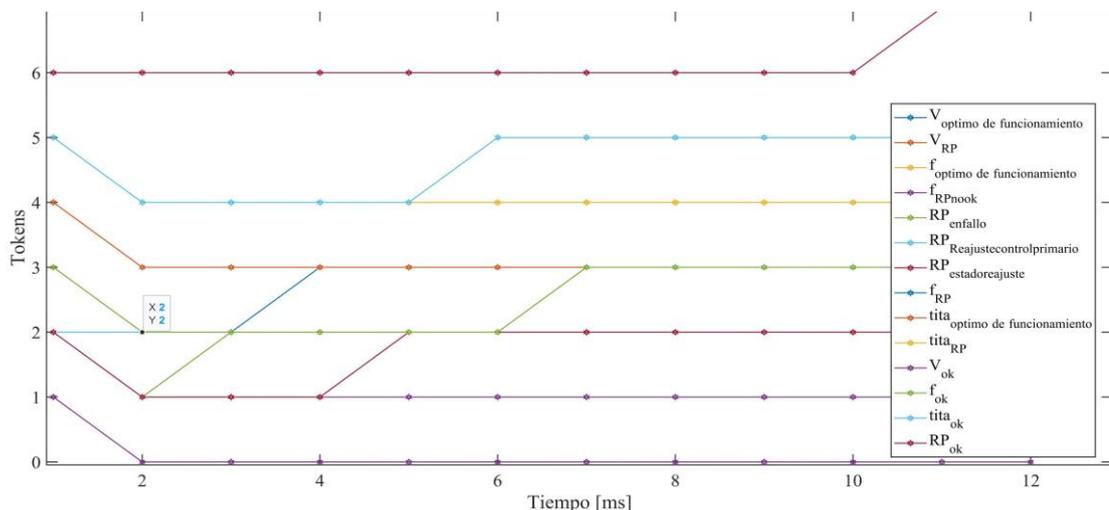
$RP_{Reajustecontrolprimario}$  que indica que se ha activado el ajuste mediante control primario, este estado se ha programado para que al no ser corregido el problema se ejecute durante dos ciclos más y si el fallo persiste pasar al estado ajuste con tolerancia a fallos. Al ser corregido el problema el token inmediatamente pasa a  $V_{RP}$  para que se realice la comparación de las variables de funcionamiento de la RP con las variables adecuadas de funcionamiento.

Al haber corregido el problema nos encontraremos en el caso anteriormente mencionado (Red Principal en condiciones adecuadas de funcionamiento) y el proceso de verificación de variables nos llevará al

estado de  $RP_{ok}$  al obtener los tokens procedentes de  $V_{RP\ ok}$ ,  $f_{RP\ ok}$ ,  $tita_{RP\ ok}$ .

**Tabla 8.** Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de frecuencia)

	<b>ENTRADAS:</b> $V_{ODF}$ , $f_{ODF}$ , $V_{RP}$ , $f_{RP}$ , $V_{ok}$ , $f_{ok}$ , $V_{RP}$ , $f_{RP}$ , $e$
<b>Paso 1:</b>	
<b>Paso 2:</b>	<b>Salidas:</b> $T_{O1}$ , $T_{O2}$ , $T_{O3}$ , $RP_{ok}$ , $RP_{RCP}$ , $f_{RP\sim ok}$
	<b>Inicialización:</b> $e = 1$ $T_{O1} = 0$ $T_{O2} = 0$ $T_{O3} = 0$
<b>Paso 3:</b>	$V_{ODF} = 1$ $f_{ODF} = 1$ $V_{RP} = 0$ $f_{RP} = 0$ $tita_{RP} = 0$ Si $(f_{RP\ de\ T_{O1}}) = 0$ y $(V_{RP\sim ok\ de\ T_{O2}}) = 1$ y $(f_{RP\sim ok\ de\ T_{O3}}) = 1$
<b>Paso 4:</b>	Entonces $RP_{RCP} = 1$ $(f_{RP\ de\ T_{O1}}) = 1$ $RP_{ok} = 1$
<b>Paso 5:</b>	<b>Retornar:</b> $V_{RP}$ , $f_{RP}$ , $tita_{RP}$



**Figura 9.** Estrategia de control ante un error en la frecuencia de la Red Principal

- Red Principal en fallo (Desviación de ángulo de fase)

En la figura 10 observamos el comportamiento de la Red de Petri en

presencia de un fallo en el ángulo de fase, este fallo en el ángulo de fase representa un problema que debe ser solucionado para la interconexión de la MR con la RP.

En el gráfico podemos observar cómo tita de funcionamiento entrega su token, mientras que se ha colocado un token en  $tita_{RP\ no\ ok}$  esto se debe a que la comparación entre estas variables nos ha dado un valor demasiado alejado de 0 indicándonos que la RP no está apta para interconexión.

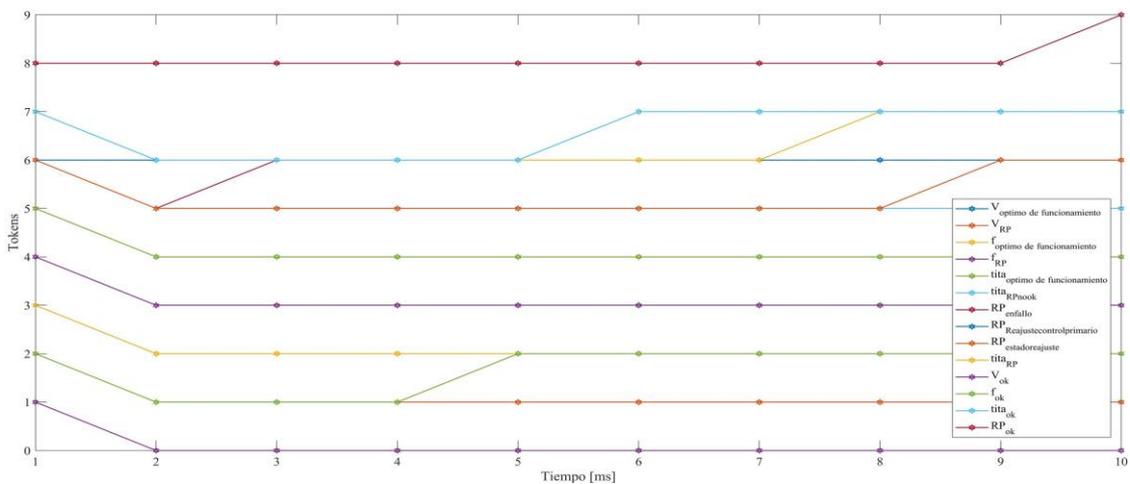
Al recibir un token el lugar  $tita_{RP\ no\ ok}$  inmediatamente lo pasa al siguiente lugar denominado  $RP_{en\ fallo}$  el que nos indica sobre el problema, el estado de la RP se encuentra en fallo por lo que este token pasa al lugar denominado  $RP_{Reajustecontrolprimario}$  que indica que se ha activado el ajuste mediante control primario, este estado se ha programado para que al no ser corregido el problema se ejecute durante dos ciclos más y si el fallo persiste pasar al estado ajuste con tolerancia a fallos. Al ser corregido el problema el token inmediatamente pasa a  $V_{RP}$  para que se realice la comparación de las variables de funcionamiento de la RP con las variables adecuadas de funcionamiento.

Al haber corregido el problema nos encontraremos en el caso anteriormente mencionado (Red Principal en condiciones adecuadas de funcionamiento) y el proceso de

verificación de variables nos llevará al estado de  $RP_{ok}$  al obtener los tokens procedentes de  $V_{RP\ ok}$ ,  $f_{RP\ ok}$ ,  $tita_{RP\ ok}$ .

**Tabla 9.** Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de ángulo de fase)

	<b>ENTRADAS:</b> $V_{ODF}$ , $f_{ODF}$ , $tita_{ODF}$ , $V_{RP}$ , $f_{RP}$ , $V_{ok}$ , $f_{ok}$ , $V_{RP}$ , $f_{RP}$ , $e$
<b>Paso 1:</b>	
<b>Paso 2:</b>	<b>Salidas:</b> $T_01$ , $T_02$ , $T_03$ , $RP_{ok}$ , $RP_{RCP}$ , $tita_{RP\sim ok}$
	<b>Inicialización:</b> $e = 1$ $T_01 = 0$ $T_02 = 0$ $T_03 = 0$
<b>Paso 3:</b>	$V_{ODF} = 1$ $f_{ODF} = 1$ $tita_{ODF} = 1$ $V_{RP} = 0$ $f_{RP} = 0$ $tita_{RP} = 0$ Si $(tita_{RP\ de\ T_01}) = 0$ y $(V_{RP\sim ok\ de\ T_02}) = 1$ y $(tita_{RP\sim ok\ de\ T_03}) = 1$
<b>Paso 4:</b>	Entonces $RP_{RCP} = 1$ $(tita_{RP\ de\ T_01}) = 1$ $RP_{ok} = 1$
<b>Paso 5:</b>	<b>Retornar:</b> $V_{RP}$ , $f_{RP}$ , $tita_{RP}$



**Figura 10.** Estrategia de control ante un error en el ángulo de fase de la Red Principal

- Micro Red en condiciones adecuadas de funcionamiento

En la figura 11 podemos observar el adecuado funcionamiento de la MR, se

puede observar como del estado  $RP_{ok}$  pasan los 3 tokens a  $V_{funcionamiento\ RP}$ ,  $f_{funcionamiento\ RP}$ , y  $tita_{funcionamiento\ RP}$ , uno a cada uno respectivamente.

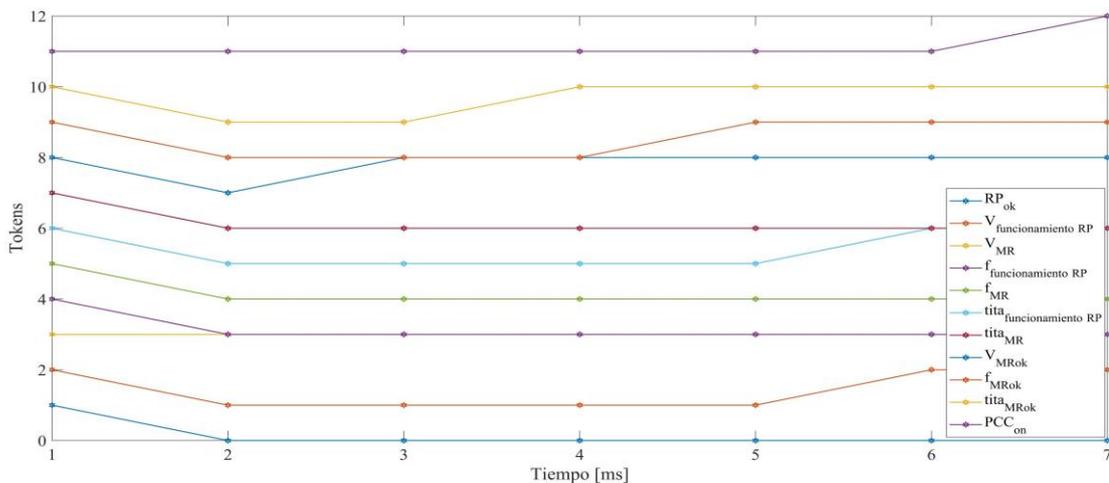
Este paso de los tokens implica que poseemos parámetros de funcionamiento a los que la MR deberá ajustarse para poder conectarse.

Posteriormente con la lectura de variables de funcionamiento de la MR podemos observar cómo se colocan tokens en los estados  $V_{MR}$ ,  $f_{MR}$  y  $tita_{MR}$ , los cuales posteriormente serán comparados con las variables de funcionamiento de la RP y al poseer un error lo más parecido a 0 procederá a pasar los tokens a los estados  $V_{MRok}$ ,  $f_{MRok}$  y  $tita_{MRok}$  indicando que los parámetros de funcionamiento son admisibles para realizar el sincronismo, al ingresar los tokens a esos estados son transmitidos directamente a  $PCC_{on}$  el cual solo se activará si y solo si pasan 3 tokens a los provenientes de  $V_{MRok}$ ,  $f_{MRok}$  y  $tita_{MRok}$ .

De esta manera se dará paso a la interconexión de la MR a la RP completando el proceso de sincronización.

**Tabla 10.** Descripción de variables micro-red

Nombre	INTERPRETACIÓN
$V_{ODF}$	Voltaje de funcionamiento.
$f_{ODF}$	Frecuencia de funcionamiento.
$tita_{ODF}$	Tita de funcionamiento.
$T_0$	Tokens
$V_{MR}$	Voltaje micro-red.
$f_{MR}$	Frecuencia micro-red.
$tita_{MR}$	Tita micro-red.
$V_{ok}$	Voltaje ok.
$f_{ok}$	Frecuencia ok.
$tita_{ok}$	Tita ok.
$RP_{ok}$	Red principal en funcionamiento correcto
$MR_{fallo}$	Micro-red en fallo.
$V_{MR\sim ok}$	Voltaje micro-red en fallo
$MR_{RCP}$	Reajuste control primario de la micro-red.
$f_{MR\sim ok}$	Frecuencia micro-red fallo
$tita_{MR\sim ok}$	Tita micro-red fallo
$V_{FMR}$	Voltaje micro-red.
$f_{FMR}$	Frecuencia micro-red.
$tita_{FMR}$	Tita micro-red.
$MR_{RCP}$	Reajuste control primario
$MR_{ERA}$	Estado de ajuste de la micro-red.



**Figura 11.** Micro Red en condiciones óptimas de funcionamiento

**Tabla 11.** Pseudocódigo micro-red en condiciones óptimas de funcionamiento

	<b>ENTRADAS:</b> $V_{ODF}, f_{ODF}, tita_{ODF}, V_{MR}, f_{MR}, tita_{MR}, V_{ok}, f_{ok}, tita_{ok}$
<b>Paso 1:</b>	
<b>Paso 2:</b>	<b>Salidas:</b> $T_01, T_02, T_03, T_04, T_05, T_06, MR_{ok}$ <b>Inicialización:</b> $T_01 = 1$ $T_02 = 1$ $T_03 = 1$ $V_{ODF} = 1$
<b>Paso 3:</b>	$f_{ODF} = 1$ $tita_{ODF} = 1$ $V_{MR} = 0$ $f_{MR} = 0$ $tita_{MR} = 0$ $Si (V_{ODF}, f_{ODF}, tita_{ODF}) = 1$ $y (V_{MR}, f_{MR}, tita_{MR}) = 1$ <i>Entonces</i> $e \cong 0$
<b>Paso 4:</b>	$T_04 = 1$ $T_05 = 1$ $T_06 = 1$ $MR_{ok} = 1$
<b>Paso 5:</b>	<b>Retornar:</b> $V_{MR}, f_{MR}, tita_{MR}$

- Micro Red en fallo (Desviación de voltaje)

En la figura 12 podemos observar el funcionamiento de la estrategia de control diseñada ante la presencia de un fallo en el voltaje, se puede observar como del estado  $RP_{ok}$  pasan los 3 tokens a  $V_{funcionamiento RP}$ ,  $f_{funcionamiento RP}$ , y  $tita_{funcionamiento RP}$ , uno a cada uno respectivamente. En este caso el token de  $V_{MR}$  se ha asignado a  $V_{MRnook}$  debido a que se ha detectado un error en la comparación de la variable de voltaje de funcionamiento de la RP y la MR demasiado alejado de cero, por lo que la estrategia de control diseñada activa los

estados de:  $MR_{enfallo}$  el que pasara de manera inmediata el token a

$MR_{Reajustecontrolprimario}$  para después ser transmitido a  $MR_{estadodelreajuste}$ , estado den el que se verificara si el problema ha sido corregido, en el caso de que el problema sea corregido el token pasara directamente a  $V_{MR}$ , con lo que el proceso mencionado en Micro Red en condiciones óptimas de funcionamiento se realizara de tal manera que se pueda llevar a cabo la interconexión de la MR con la RP.

En el caso de que el problema no se ha resuelto la estrategia de control está diseñada para ejecutar el reajuste mediante control primario por dos veces más para de esta manera corregir el problema y si al pasar los dos lazos no se ha corregido el problema la estrategia de control se ha diseñado para pasar a un ajuste con tolerancia a fallas con el fin de lograr la correcta interconexión entre los dos sistemas.

**Tabla 12.** Pseudocódigo micro-red en fallo (Desviación de voltaje)

<b>Paso 1:</b>	<b>ENTRADAS:</b> $V_{ODF}, V_{MR-ok}, V_{MR}, f_{MR}$
<b>Paso 2:</b>	<b>Salidas:</b> $T_01, T_02, T_03, RP_{ok}, MR_{fallo}, MR_{RCP}$ <b>Inicialización:</b> $e = 1$ $T_01 = 0$ $T_02 = 0$
<b>Paso 3:</b>	$T_03 = 0$ $V_{ODF} = 1$ $V_{MR} = 0$ $f_{MR} = 0$ $tita_{MR} = 0$ $Si (V_{ODF} de T_01) = 0 y (V_{MR-ok} de T_02) = 1$
<b>Paso 4:</b>	<i>Entonces</i> $(V_{MR} de T_03) = 1$ $RP_{ok} = 1$
<b>Paso 5:</b>	<b>Retornar:</b> $V_{MR}, f_{MR}, tita_{MR}$

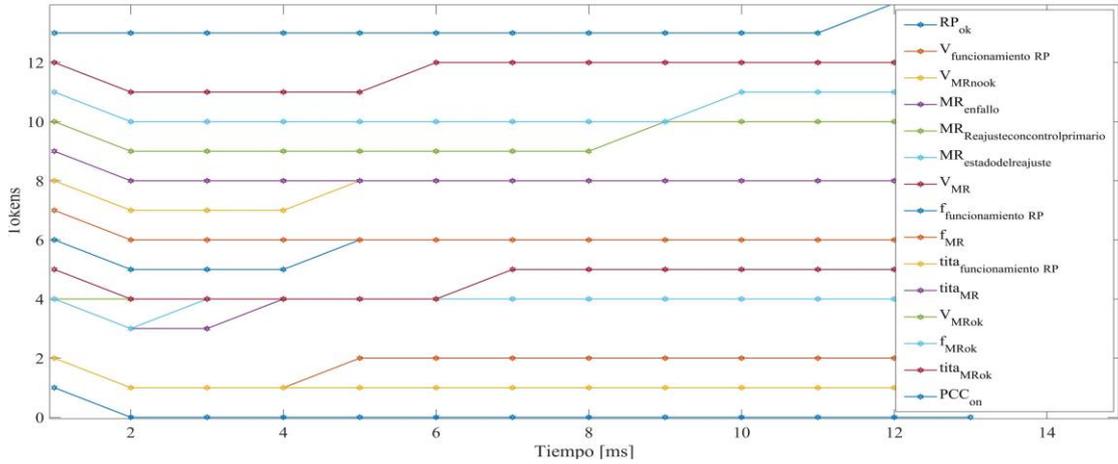


Figura 12. Estrategia de control ante un error en el voltaje de la Micro Red

- Micro Red en fallo (Desviación de la frecuencia)

En la figura 13 podemos observar el funcionamiento de la estrategia de control diseñada ante la presencia de un fallo en la frecuencia, se puede observar como del estado  $RP_{ok}$  pasan 3 tokens a  $V_{funcionamiento\ RP}$ ,  $f_{funcionamiento\ RP}$ , y  $tita_{funcionamiento\ RP}$ , uno a cada uno respectivamente. En este caso el token de  $f_{MR}$  se ha asignado a  $f_{MRnook}$  debido a que se ha detectado un error en la comparación de la variable de frecuencia de funcionamiento de la RP y la MR demasiado alejado de cero, por lo que la estrategia de control diseñada activa los estados de:  $MR_{en\ fallo}$  el que pasara de manera inmediata el token a  $MR_{Reajustecontrolprimario}$  para después ser transmitido a  $MR_{estadodelreajuste}$ , estado den el que se verificara si el problema ha sido corregido, en el caso de que el problema sea corregido el token pasara directamente a  $f_{MR}$ , con lo que el proceso mencionado en Micro Red en condiciones óptimas de funcionamiento se realizara de tal manera que se pueda llevar a cabo la interconexión de la MR con la RP. En el caso de que el problema no se ha resuelto la estrategia de control está diseñada para ejecutar el reajuste mediante control primario por dos veces más para de esta manera corregir el

problema y si al pasar los dos lazos no se ha corregido el problema la estrategia de control se ha diseñado para pasar a un ajuste con tolerancia a fallas con el fin de lograr la correcta interconexión entre los dos sistemas.

Tabla 13. Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de frecuencia)

	<b>ENTRADAS:</b> $V_{ODF}$ , $f_{ODF}$ , $V_{MR}$ , $f_{MR}$ , $V_{ok}$ , $f_{ok}$ , $V_{RP}$ , $f_{RP}$ , $e$
<b>Paso 1:</b>	
<b>Paso 2:</b>	<b>Salidas:</b> $T_01$ , $T_02$ , $T_03$ , $RP_{ok}$ , $MR_{RCP}$ , $f_{MR\sim ok}$
	<b>Inicialización:</b> $e = 1$ $T_01 = 0$ $T_02 = 0$ $T_03 = 0$
<b>Paso 3:</b>	$V_{ODF} = 1$ $f_{ODF} = 1$ $V_{MR} = 0$ $f_{MR} = 0$ $tita_{MR} = 0$ Si $(f_{MR\ de\ T_01}) = 0$ y $(V_{MR\sim ok\ de\ T_02}) = 1$ y $(f_{MR\sim ok\ de\ T_03}) = 1$
<b>Paso 4:</b>	Entonces $MR_{RCP} = 1$ $(f_{MR\ de\ T_01}) = 1$ $MR_{ok} = 1$
<b>Paso 5:</b>	<b>Retornar:</b> $V_{MR}$ , $f_{MR}$ , $tita_{MR}$

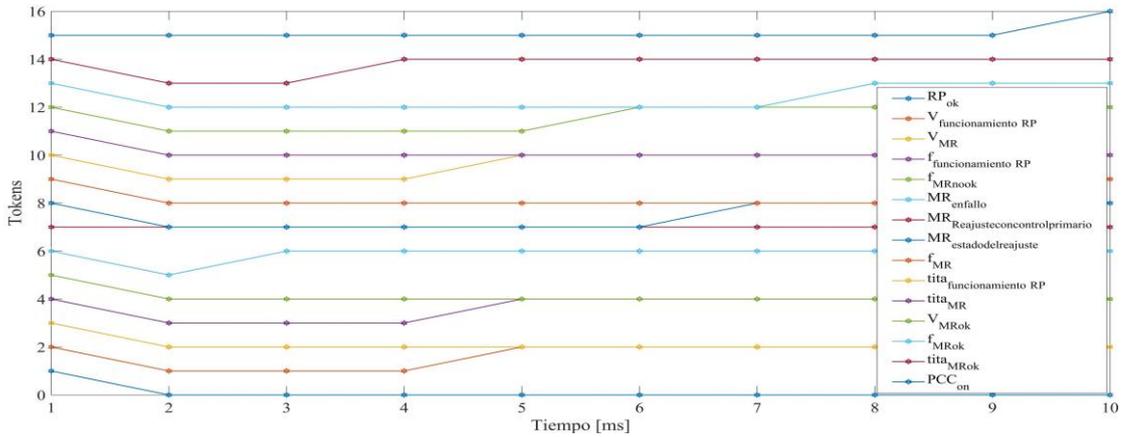


Figura 13. Estrategia de control ante un error en la frecuencia de la Micro Red

- Micro Red en fallo (Desviación del ángulo de fase)

En la figura 14 podemos observar el funcionamiento de la estrategia de control diseñada ante la presencia de un fallo en el ángulo de fase, se puede observar como del estado  $RP_{ok}$  pasan 3 tokens a  $V_{funcionamiento RP}$ ,  $f_{funcionamiento RP}$ , y  $tita_{funcionamiento RP}$ , uno a cada uno respectivamente. En este caso el token de  $tita_{MR}$  se ha asignado a  $tita_{MRnook}$  debido a que se ha detectado un error en la comparación de la variable de ángulo de fase de funcionamiento de la RP y la MR demasiado alejado de cero. Por esta razón la estrategia de control diseñada activa los estados de:  $MR_{enfallo}$  el que pasara de manera inmediata el token a  $MR_{reajustecontrolprimario}$  para después ser transmitido a  $MR_{estadodelreajuste}$ , estado en el que se verificara si el problema ha sido corregido. En el caso de que el problema sea corregido el token pasara directamente a  $f_{MR}$ , por lo que el proceso mencionado en la Micro Red en condiciones óptimas de funcionamiento se realizara de tal manera que se pueda llevar a cabo la interconexión de la MR con la RP.

En el caso de que el problema no se ha resuelto la estrategia de control está diseñada para ejecutar el reajuste mediante control primario por dos veces

más para de esta manera corregir el problema. Si al transcurrir los dos lazos no se ha corregido el problema la estrategia de control se ha diseñado para pasar a un ajuste con tolerancia a fallas con el fin de lograr la correcta interconexión entre los dos sistemas.

Tabla 14. Pseudocódigo red principal en fallo (Desviación de ángulo de fase)

	ENTRADAS: $V_{ODF}$ , $f_{ODF}$ , $tita_{ODF}$ , $V_{MR}$ , $f_{MR}$ , $V_{ok}$ , $f_{ok}$ , $V_{MR}$ , $f_{MR}$ , $e$
<b>Paso 1:</b>	$V_{ok}$ , $f_{ok}$ , $V_{MR}$ , $f_{MR}$ , $e$
<b>Paso 2:</b>	<b>Salidas:</b> $T_01$ , $T_02$ , $T_03$ , $RP_{ok}$ , $MR_{RCP}$ , $tita_{MR\sim ok}$
	<b>Inicialización:</b> $e = 1$ $T_01 = 0$ $T_02 = 0$ $T_03 = 0$
<b>Paso 3:</b>	$V_{ODF} = 1$ $f_{ODF} = 1$ $tita_{ODF} = 1$ $V_{MR} = 0$ $f_{MR} = 0$ $tita_{MR} = 0$ <i>Si</i> ( $tita_{MR}$ de $T_01$ ) = 0 y ( $V_{MR\sim ok}$ de $T_02$ ) = 1 y ( $tita_{MR\sim ok}$ de $T_03$ ) = 1
<b>Paso 4:</b>	<i>Entonces</i> $MR_{RCP} = 1$ ( $tita_{MR}$ de $T_01$ ) = 1 $RP_{ok} = 1$
<b>Paso 5:</b>	<b>Retornar:</b> $V_{MR}$ , $f_{MR}$ , $tita_{MR}$

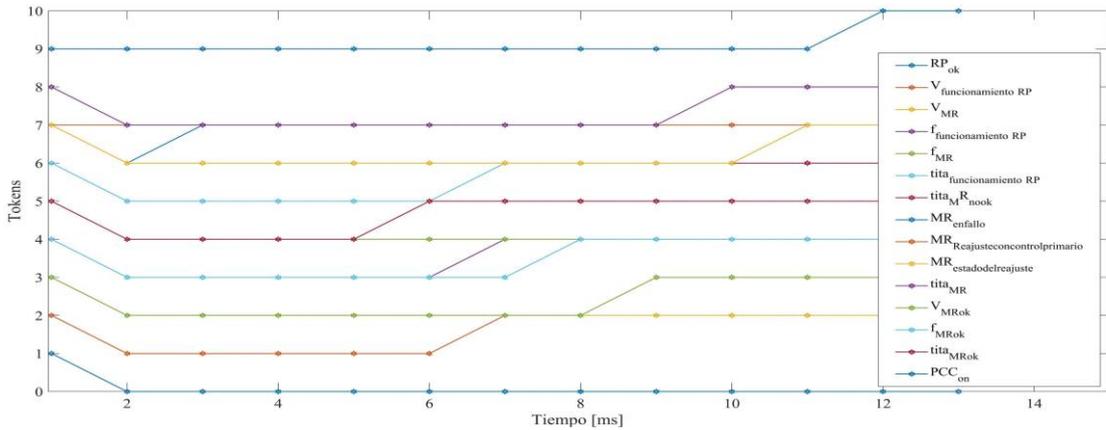


Figura 14. Estrategia de control ante un error en el ángulo de fase de la Micro Red

## 7.2 Caso 2 análisis de la estrategia de control

En la figura 15 podemos observar el funcionamiento de la MR, en el cual es posible observar cómo desde  $t = 0$  segundos hasta  $t = 2$  segundos tenemos un funcionamiento normal de la MR en el caso del voltaje con un voltaje equivalente a 200 voltios, a partir de  $t = 3$  segundos hasta  $t = 4$  segundos es posible observar un descenso del voltaje a 100 voltios, en  $t = 7$  segundos hasta  $t = 13$  segundos encontramos que el voltaje se estabiliza en 180 voltios, para después seguir incrementando hasta llegar a 300 voltios en  $t = 20$  segundos. En  $t = 1$  segundos hasta  $t = 4$  segundos el ángulo de fase se encuentra en los valores de operación adecuados de la red, a partir de  $t = 4$  segundos es posible observar un

incremento paulatino del ángulo de fase, saliendo de los valores adecuados de funcionamiento de la red. Desde  $t = 4$  segundos hasta  $t = 6$  segundos es posible observar que la frecuencia se encuentra en valores óptimos de operación, antes de estos tiempos observamos que la frecuencia es menor a la indicada para el funcionamiento de la red, después de los tiempos descritos observamos como la frecuencia se encuentra por encima de los valores adecuados de funcionamiento de la red. A partir de estos tiempos es posible observar cómo los valores de funcionamiento fluctúan, dándonos como resultado un comportamiento de la MR en fallo hasta que en  $t = 15$  segundos podemos observar cómo los valores de funcionamiento de la MR vuelven a un estado óptimo, durando este estado óptimo hasta  $t = 18$  segundos.

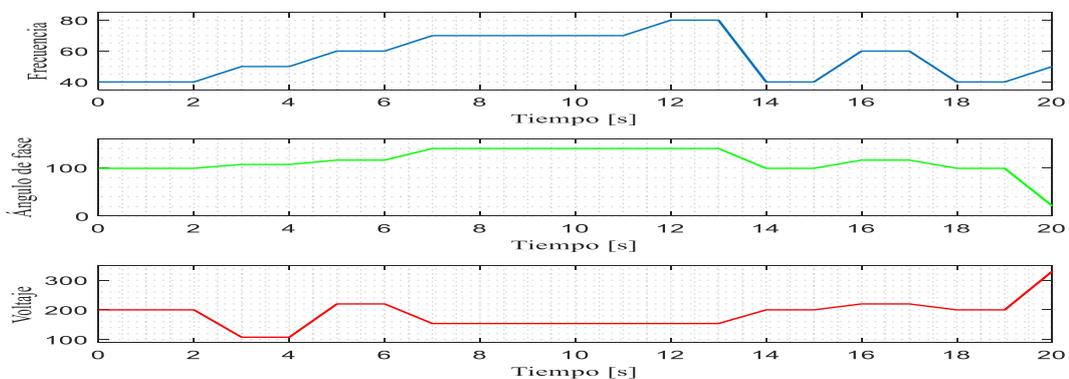


Figura 15. Funcionamiento de la Microrred

En la figura 16 observamos el funcionamiento con respecto a los valores de funcionamiento de la figura 16. Es posible observar como en  $t = 0$  hasta  $t = 4$  el estado del controlador PCC on se encuentra en cero, esto nos indica que no es posible conectarse lo que se debe a que la frecuencia no cumple las condiciones para el correcto sincronismo, caso contrario RCP presenta el valor de uno indicando que se debe realizar un reajuste mediante control primario, a partir de  $t = 4$  hasta  $t = 7$  es posible observar un cambio de estado en el cual observamos como RCP toma el valor de cero al mismo tiempo que PCC on toma el valor de 1 indicándonos que la red está en condiciones aptas para el correcto sincronismo. A partir de  $t = 7$  podemos observar cómo existe un cambio de estados, esto se debe a que los valores de operación de la MR han cambiado y se

encuentran por encima de los valores óptimos de funcionamiento para el sincronismo haciendo que PCC on tome el valor de cero haciendo que se desconecte la MR y al mismo tiempo RCP toma el valor de uno indicando que es necesario un reajuste.

En  $t=15$  podemos observar cómo es que los estados RCP y PCC on cambian, esto se debe a que los valores de funcionamiento de nuevo se encuentran en los valores óptimos de funcionamiento, permitiendo la conexión de la MR hasta  $t = 18$  donde cambia el estado de la MR de nuevo a un estado de fallo.

Es importante mencionar que la gráfica el ajuste con tolerancia a fallos (ATF) no actúa debido a la condición con la que ha sido programado el control, es necesario que se ejecute por 3 veces RCP para que este se active.

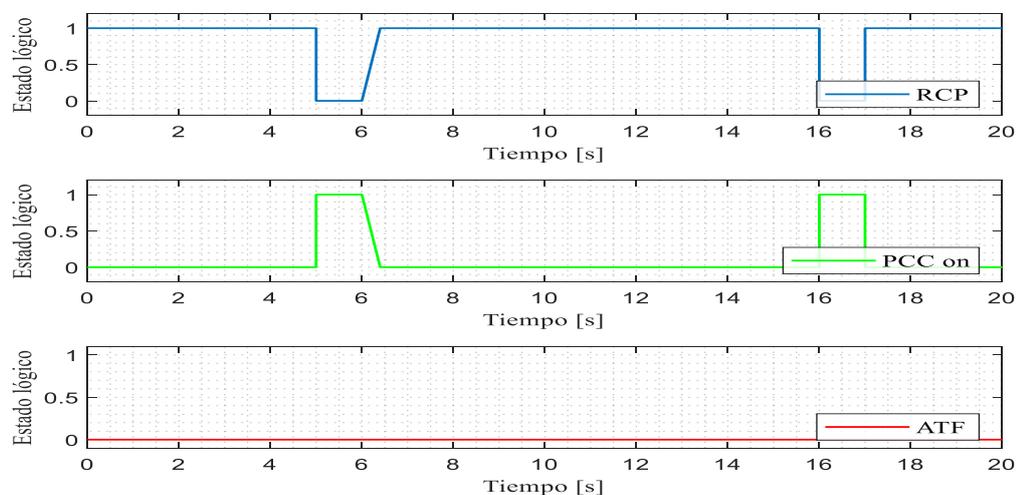


Figura 16. Resultados de control mediante estrategia diseñada

### 7.3 Caso 3 implementación de la estrategia de control

Al implementar la estrategia de control en el modelo del trabajo Hybrid AC/DC microgrid test system simulation encontramos [2], [59].

En la figura 17 observamos el comportamiento de la RP durante un tiempo de 0.35 segundos, en el cual podemos encontrar que las gráficas corresponden a las señales de voltaje [pu], frecuencia [Hz] y ángulo [°] de fase. Encontramos que el voltaje de funcionamiento de la Rp se encuentra sobre 1.7 [pu] a partir de  $t = 0.02$

segundos, después de este tiempo el valor del voltaje se mantendrá estable en el valor anteriormente indicado. La frecuencia posee un pico sobre los 60.25[Hz] hasta estabilizarse en  $t = 0.1$  segundos, a partir de este tiempo observamos como la frecuencia se ha estabilizado.

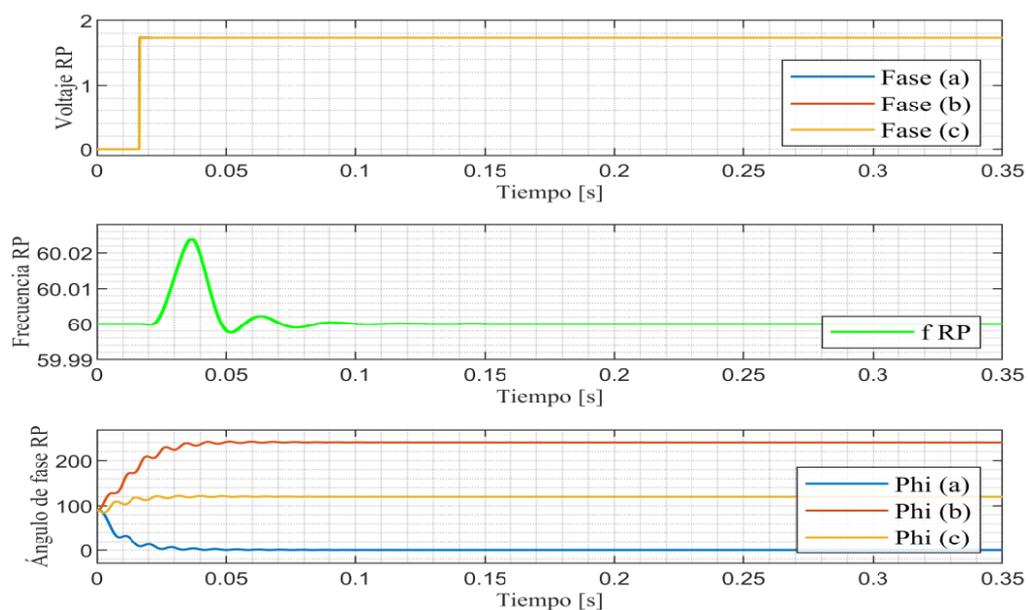
El ángulo de fase lo encontramos en 250 [°], 100 [°] y 0 [°].

Estos parámetros de funcionamiento serán los que la estrategia de control

empleara para realizar las respectivas comparaciones que definen sus estados.

Es importante recordar que a estos parámetros son a los que la micro-red deberá ajustar su funcionamiento con el fin de poder llevar a cabo la interconexión, esta acción de reajuste de parámetros deberá ser llevada a cabo por medio de los diferentes tipos de controles propuestos en el modelo.

Este comportamiento fue extraído de la simulación del trabajo presentado en [2], [59].



**Figura 17.** Parámetros de funcionamiento de la Red Principal

En la figura 18 observamos el comportamiento de la MR en condiciones de funcionamiento de máxima carga de la red, las gráficas corresponden a las señales de voltaje [pu], frecuencia [Hz] y ángulo [°] de fase pertenecientes a la MR.

Encontramos que el voltaje de funcionamiento de la MR desde  $t = 0$  segundos hasta  $t = 2$  segundos es equivalente a 0 voltios, a partir de  $t = 0.02$  segundos se encuentra por debajo de 1 [pu], manteniéndose en este valor hasta  $t = 0.35$  segundos. La frecuencia posee un pico sobre los 60.1[Hz] hasta estabilizarse en  $t = 0.25$ , los valores de

frecuencia una vez que está ya se estabilizo son de 60.05 [Hz] hasta  $t = 0.35$  segundos.

El ángulo de fase lo encontramos en 200 [°], 100 [°] y 0 [°].

Estos parámetros de funcionamiento serán los que la estrategia de control empleara para realizar las respectivas comparaciones que definen sus estados.

Es posible observar que los parámetros de funcionamiento de la MR son totalmente distintos a los parámetros de funcionamiento de la Rp.

Una vez que la estrategia de control realice la comparación de los

parámetros de funcionamiento de la MR con los de la RP tomara la decisión de conexión o desconexión de la MR dependiendo del estado de la misma, al

no ser posible el cambio de estado de la MR se activaran las señales que advierten la necesidad de activación del tipo de control necesario.

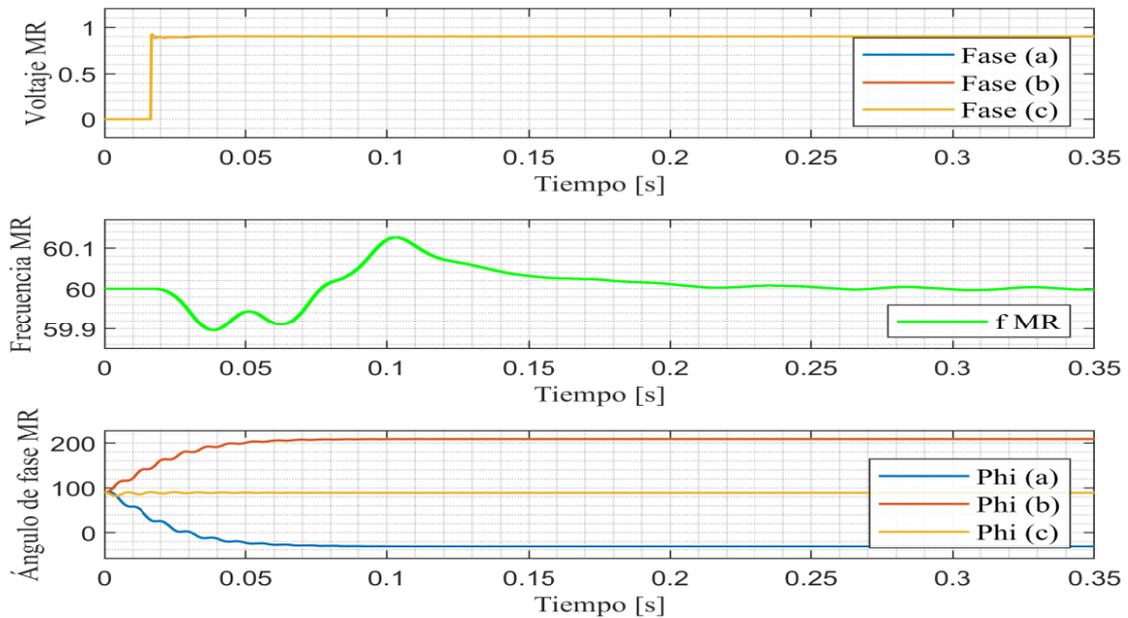


Figura 18. Parámetros de funcionamiento de la Micro-red

En la figura 20 es posible observar el comportamiento de la estrategia de control ante las condiciones mostradas en las figuras 18 y 19, la estrategia de control se encuentra en el estado de RCP debido a que como se puede observar en las gráficas anteriormente mencionadas tanto la RP como la MR no se encuentran en condiciones aptas para la interconexión.

Las condiciones que imposibilitan la interconexión son:

- El voltaje de la MR es menor al de la RP siendo la diferencia entre estos de 0.9 [pu] condición que no es apta para la interconexión.
- En el caso de la frecuencia la frecuencia de la MR es ligeramente superior a la frecuencia de la RP, en el caso de la frecuencia poseemos un estado adecuado para la interconexión.

- En el caso del ángulo de fase es posible observar que tanto el ángulo de fase de la MR como el de la RP coinciden haciendo posible la interconexión.

Observamos que dos de las tres condiciones son adecuadas para llevar a cabo la interconexión, pero al tener diferentes voltajes en los dos sistemas es imposible llevar a cabo la interconexión.

Al no poseer el control primario solo la señal que lo activa es posible observar que el estado PCC on no cambia, al igual que el estado de reajuste mediante control primario. Este análisis se realizó por 0.35 segundos comprobando que la estrategia de control actúa en forma correcta.

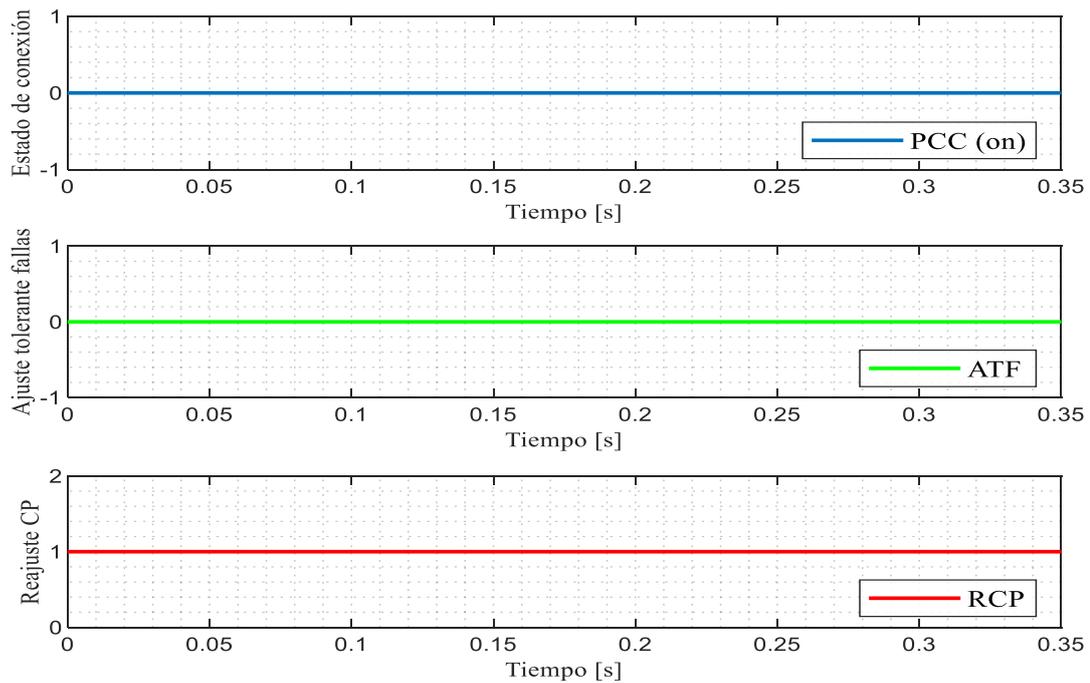


Figura 19. Comportamiento de la estrategia de control implementada

## 7 Conclusiones

Determinamos que el empleo de redes de Petri para el análisis y control de cambios de estados de la MR es una herramienta adecuada, debido a que por la característica que estas poseen de representar estados mediante los lugares y procesos. Mediante las transiciones estas permiten observar de una manera más sencilla el comportamiento de todo el sistema, así de esta manera facilitan la toma de decisiones de sincronismo de la MR.

Se diseñó una estrategia de control capaz de tomar decisiones de sincronismo basada en redes Petri, esta estrategia de control emplea la comparación de valores referenciales de operación y valores propios de operación de la MR para determinar los estados de funcionamiento, con lo que es capaz de determinar si la MR se encuentra en condiciones de conexión o si necesita que entre en acción el control primario o ajuste con tolerancia a fallos.

Determinamos que el control de conexión y desconexión de la MR mediante redes de Petri es altamente efectivo, esto se debe a los tiempos de funcionamiento de la misma los que van entre 11 a 13 milisegundos en los casos de adecuado funcionamiento y de 13 a 15 milisegundos en el caso de aparición de algún fallo en la MR, para la toma de decisiones de cambio de estados de la MR.

Determinamos que el control basado en redes de Petri conlleva muchas ventajas, debido que al poseer representaciones matemáticas, matriciales y gráficas permite simplificar el análisis y procesamiento de datos de sistemas complejos.

## 7 Trabajos futuros

Es importante realizar el control primario y ajuste con tolerancia a fallas y acoplarlas a la estrategia de control de tal manera que las señales recibidas por el mismo adapten las condiciones de funcionamiento del sistema.

## 8 Referencias

- [1] M. Amin *et al.*, “Control-enabled Smart Grid: Scenarios for 2030 to 2050,” in *IEEE Vision for Smart Grid Controls: 2030 and Beyond*, 2013, pp. 53–84.
- [2] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonz, I. Isaac, and J. L. Gabriel, “Hybrid AC / DC microgrid test system simulation: grid-connected mode,” *Heliyon*, vol. 5, no. August, p. 21, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [3] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, “Recent developments in microgrids and example cases around the world - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 4030–4041, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.033.
- [4] T. Khyzhniak and V. Kolesnyk, “Modeling of power-supply subsystems of microgrid using Petri nets,” *2013 IEEE 33rd Int. Sci. Conf. Electron. Nanotechnology, ELNANO 2013 - Conf. Proc.*, pp. 391–395, 2013, doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552045.
- [5] K. Hajar, A. Hably, S. Bacha, A. Elrafhi, and Z. Obeid, “An application of a centralized model predictive control on microgrids,” *2016 IEEE Electr. Power Energy Conf. EPEC 2016*, 2016, doi: 10.1109/EPEC.2016.7771775.
- [6] L. Ortiz, J. W. Gonz, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-santiago, “A review on control and fault-tolerant control systems of AC / DC microgrids,” *Heliyon*, vol. 6, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
- [7] A. Téllez, A. Robayo, G. López, L. Ortiz, I. Isaac, and J. González, “Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm,” 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984965.
- [8] L. Ortiz Matos, L. B. Gutierrez Zea, J. W. González Sanchez, and A. Aguila Tellez, “An ARX-Petri Nets algorithm for Active Identification of an AC / DC Microgrid Simulation,” in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2019, p. 6, doi: 10.1109/CCAC.2019.8921191.
- [9] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, and A. Águila, “A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets,” *Heliyon*, vol. 6, no. March, p. 18, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.
- [10] J. G. B. Sánchez and L. O. Matos, “Estrategia de tolerancia a fallas por condiciones ambientales para IEDS en subestaciones de distribución,” Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [11] L. Ortiz and A. Aguila, *Modeling and Control of an Automated System in Surgical Microscopy Based on Petri Nets*, vol. 14, no. 1. 2016, pp. 96–101.
- [12] F. M. Armas Chamorro and L. Ortiz Matos, “Modelización con Petri Net de una aplicación automática de diagnóstico y restauración de avería en sistema de distribución,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [13] L. O. Matos, J. Wilson, and G. Sanchez, “Reconfiguration Strategy for Fault Tolerance of Power Distribution Systems Using Petri Net,” 2016, doi: 10.1109/ETCM.2016.7750820.
- [14] G. K. Chinchuña Toledo and L. Ortiz Matos, “Mejoramiento de la fiabilidad en microrredes

- mediante el control robusto de voltaje usando técnicas pasivas de tolerancia a fallos,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [15] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T.-L. Lee, and P. C. Loh, “Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2194969.
- [16] Q. C. Zhong and T. Hornik, *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*. 2012.
- [17] J. M. Mantilla González, C. A. Duque Daza, and C. H. Galeano Urueña, “Análisis del esquema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico colombiano,” *Rev. Fac. Ing.*, no. 44, pp. 97–110, 2008.
- [18] A. G. Sanchez and M. G. Molina, “Desarrollo e implementación de micro-redes eléctricas de corriente continua con integración de recursos energéticos distribuidos,” *Xvi Eriac*, no. May, 2015.
- [19] R. Real-Calvo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, M. J. Gonzalez-Redondo, I. M. Moreno-Garcia, and E. J. Palacios-Garcia, “Sistema Electrónico Inteligente para el Control de la Interconexión entre Equipamiento de Generación Distribuida y la Red Eléctrica,” *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 14, no. 1, pp. 56–69, 2017, doi: 10.1016/j.riai.2016.11.002.
- [20] A. D. G. Esteves, “Avances en energías renovables y medio ambiente,” *Asades*, vol. 7, no. 2, p. 4, 2013.
- [21] J. D. Rodr, “Estudio sobre las interconexiones de los sistemas eléctricos de las Islas Canarias,” no. June, 2010.
- [22] “Sistemas multi-agente para micro-redes en modo isla,” 2020 *Inform. Ind.*, vol. 14, no. 1, pp. 56–69, 2017, doi: 10.1016/j.riai.2016.11.002.
- [23] F. A. Urgiles Navarrete and L. Ortiz Matos, “Estrategia de identificación dinámica no lineal basada en NARX para fuentes de generación distribuida acopladas electrónicamente a micro – redes AC/DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [24] S. P. Quishpe Guamantica and L. Ortiz Matos, “Detección de fallas de sensado en convertidores CA/CC para micro-redes híbridas usando análisis de componentes principales (PCA),” Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [25] S. X. Garrido Jácome and L. Ortiz Matos, “Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [26] A. F. Falcón Ayala and L. Ortiz Matos, “Confiabilidad en microredes eléctricas AC/DC usando control robusto  $H_\infty$  y estrategias de tolerancia a fallas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2019.
- [27] A. Deshpande, K. Karnataki, K. Darshana, P. Deshpande, H. Mitavachan, and G. Shankar, “Smart Renewable Energy Micro Grid for Indian Scenarios,” *Proc. - 2015 21st Annu. Int. Conf. Adv. Comput. Commun. ADCOM 2015*, pp. 22–26, 2016, doi: 10.1109/ADCOM.2015.11.
- [28] C. Bordons, F. García-Torres, and L. Valverde, “Gestión

- Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable,” *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 12, no. 2, pp. 117–132, 2015, doi: 10.1016/j.riai.2015.03.001.
- [29] J. A. P. Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, “Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 9, pp. 1189–1203, 2007, doi: 10.1016/j.epsr.2006.08.016.
- [30] A. M. Annaswamy and M. Amin, *IEEE Vision for Smart Grid Controls: 2030 and Beyond*. 2013.
- [31] A. Dimitriou, P. Kotsampopoulos, and N. Hatziargyriou, “Best practices of rural electrification in developing countries: Technologies and case studies,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2014, no. CP665, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1049/cp.2014.1658.
- [32] F. Katiraei, M. R. Iravani, and P. W. Lehn, “Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 1, pp. 248–257, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835051.
- [33] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, “Stochastic Energy Management of Microgrids during Unscheduled Islanding Period,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 3, pp. 1079–1087, 2017, doi: 10.1109/TII.2016.2646721.
- [34] A. Bidram and A. Davoudi, “Hierarchical structure of microgrids control system,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1963–1976, 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2197425.
- [35] E. Unamuno and J. A. Barrena, “Hybrid ac/dc microgrids - Part I: Review and classification of topologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1251–1259, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.194.
- [36] D. R. Antonio and S. Puente, “Grupo de Sistemas Electrónicos Industriales,” no. February, 2019, doi: 10.4995/Thesis/10251/118658.
- [37] X. Liu, P. Wang, and P. C. Loh, “A hybrid AC/DC micro-grid,” *2010 9th Int. Power Energy Conf. IPEC 2010*, pp. 746–751, 2010, doi: 10.1109/IPEC2010.5697024.
- [38] E. Unamuno and J. A. Barrena, “Hybrid ac/dc microgrids - Part II: Review and classification of control strategies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1123–1134, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.186.
- [39] J. B. Cabrera, V. M. Fernando, P. Arias, and D. Icaza, “Concepts Game Theory Applied in Smart Grid,” *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conf. Proc.*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564682.
- [40] J. Gutiérrez and L. Flórez, “High-efficiency dc-ac converter based on EG 8010 modulator to implement in alternative energy systems,” vol. 13, no. 2, pp. 51–59, 2019.
- [41] C. Aguilar, A. Vazquez, F. Canales, and J. Gordillo, “Integrated DC AC Converter as Power Conditioner for Fuel Cell Based System,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2107–2113, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7530402.
- [42] L. Ortiz Matos, A. Aguila Tellez, R. C. Hincapié Reyes, and J. .

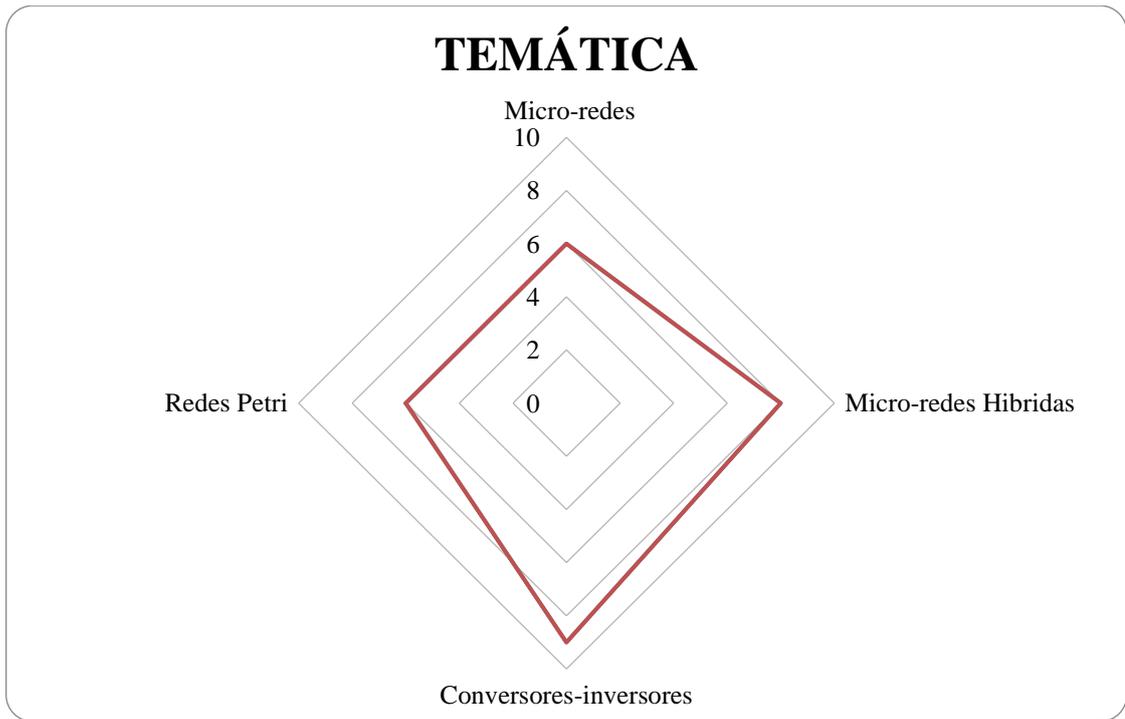
- González Sanchez, “Multi-Criteria Optimization of the Deployment of a Grid for Rural Electrification Based on a Heuristic Method,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012020, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012020.
- [43] D. Atkar, P. S. Udakhe, S. Chiriki, and V. B. Borghate, “Control of seven level cascaded H-bridge inverter by hybrid SPWM technique,” *IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2016*, vol. 2016-Janua, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914435.
- [44] D. Arias Cazco, R. A. Robayo Vasco, and L. Ortiz Matos, “Novel inteligente Step Voltaje Regulator (SVR) for residential electrical connections,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1656–1661, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7483497.
- [45] Z. Chen, K. Wang, Z. Li, and T. Zheng, “A review on control strategies of AC/DC micro grid,” *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC / I CPS Eur. 2017*, 2017, doi: 10.1109/IEEEIC.2017.7977807.
- [46] M. B. Delghavi and A. Yazdani, “Islanded-mode control of electronically coupled distributed-resource units under unbalanced and nonlinear load conditions,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 2, pp. 661–673, 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2042081.
- [47] J. R. Collaguazo Solís and L. Ortiz Matos, “Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [48] M. S. Mahmoud, S. Azher Hussain, and M. A. Abido, “Modeling and control of microgrid: An overview,” *J. Franklin Inst.*, vol. 351, no. 5, pp. 2822–2859, May 2014, doi: 10.1016/j.jfranklin.2014.01.016.
- [49] D. E. Olivares *et al.*, “Trends in microgrid control,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [50] H. Krishnaswamy and L. Zhang, “Analog and RF Interference Mitigation for Integrated MIMO Receiver Arrays,” *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 561–575, 2016, doi: 10.1109/JPROC.2016.2519885.
- [51] X. Yang, S. Zhang, and H. Li, “Research and implementation of precise time synchronization system of microgrid based on IEEE 1588,” *Proc. 2016 IEEE Adv. Inf. Manag. Commun. Electron. Autom. Control Conf. IMCEC 2016*, pp. 258–261, 2017, doi: 10.1109/IMCEC.2016.7867212.
- [52] T. Uten, C. Charoenlarnnoppa, and P. Suksompong, “Synchronization Control for Microgrid Seamless Reconnection,” *Proc. - 2019 14th Int. Jt. Symp. Artif. Intell. Nat. Lang. Process. iSAI-NLP 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/iSAI-NLP48611.2019.9045428.
- [53] J. Cervantes, “Representación y aprendizaje de conocimiento con redes de Petri difusas,” p. 162, 2015.
- [54] F. Bause, “Queueing Petri Nets-A formalism for the combined qualitative and quantitative analysis of systems,” *Proc. 5th*

- Int. Work. Petri Nets Perform. Model. PNPM 1993*, pp. 14–23, 1993, doi: 10.1109/PNPM.1993.393439.
- [55] T. Murata, “Petri Nets : Properties , Analysis and Appl k a t ions,” vol. 77, no. 4, pp. 541–580, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/5.24143 EC - FA - 55>.
- [56] C. Arias *et al.*, “MODELING WITH PETRI NETS AND IMPLEMENTATION WITH GRAFCET OF A FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM WITH CONCURRENT PROCESSES AND RESUMEN En este trabajo , se presenta el modelado de un Sistema de Manufactura Flexible ( SMF ), con procesos concurrentes y recursos,” 2010.
- [57] R. Davidrajuh, *APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY Modeling Discrete-Event Systems with GPenSIM An Introduction*. 2018.
- [58] P. Systems, “1547 IEEE Standards,” *IEEE Std 1547-2003*, no. July, 2003.
- [59] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonz, I. Isaac, and J. L. Gabriel, “Hybrid AC/DC & DC microgrid test system simulation (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73878-hybrid-ac-dc-dc-microgrid-test-system-simulation>.” MATLAB Central File Exchange, 2020, [Online]. Available: [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73878-hybrid-ac-dc-dc-microgrid-test-system-simulation?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73878-hybrid-ac-dc-dc-microgrid-test-system-simulation?s_tid=srchtitle).

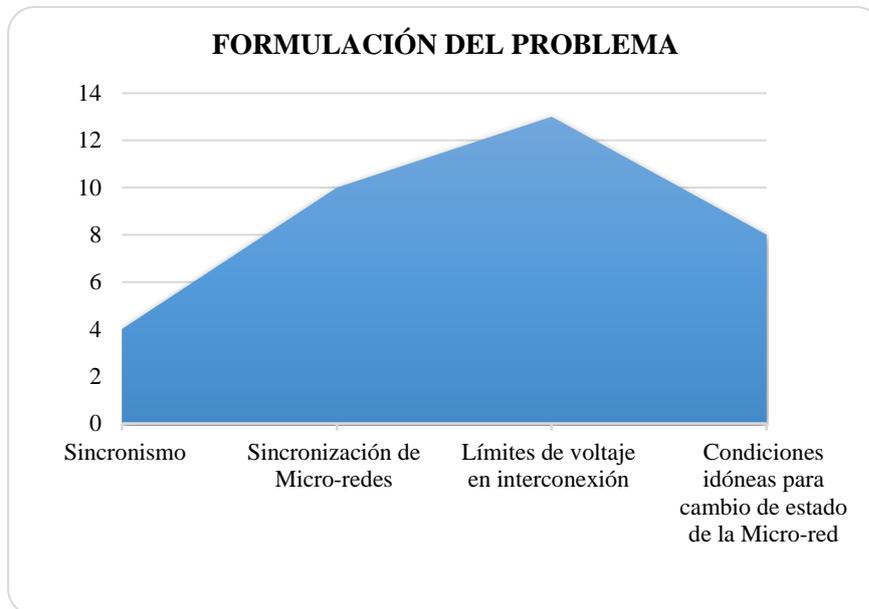
## 9 Estado del Arte

PLANEACIÓN ÓPTIMA PARA DESPLIEGUE DE REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA REQUERIDA POR SMART GRID																									
DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	Micro-redes	Micro-redes Híbridas	Convertidores-inversores	Redes Petri	Sincronismo	Sincronización de Micro-redes	Límites de voltaje en interconexión	Condiciones idóneas para cambio de estado de la Micro-red	Modos de funcionamiento de Micro-redes	Control de las Micro-redes	Análisis de tipo de conexión de Micro-redes con la red principal	Restricciones de voltaje	Restricciones de Frecuencia	Restricciones de ángulo de fase	Redes Petri	Estrategias de control para interconexión	Cambio dinámico de estados de una Micro-red	Estrategias de control de Micro-redes	Diseño de estrategias de control	Modelado de sistema de control basado en Redes Petri	Análisis del estado de la Micro-red	Análisis de sistemas de control para la interconexión de Micro-redes
1	2013	Control-enabled Smart Grid : Scenarios for 2030 to 2050.	1	☒	☒	☒			☒		☒		☒									☒			
2	2011	Recent developments in microgrids and example cases around the world - A review.	2			☒			☒	☒		☒													
3	2013	Modeling of power-supply subsystems of microgrid using Petri nets.	3		☒	☒				☒				☒											
4	2016	An application of a centralized model predictive control on microgrids.	4	☒				☒						☒											
5	2013	Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control.	5		☒	☒			☒			☒			☒		☒								
6	2012	Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration.	6																				☒	☒	
7	2020	A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids.	7						☒	☒	☒						☒			☒			☒		☒
8	2015	Smart Renewable Energy Micro Grid for Indian Scenarios.	8											☒	☒	☒									
9	2015	Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable.	9	☒		☒	☒			☒		☒		☒	☒					☒		☒		☒	☒
10	2017	Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities.	10	☒																		☒	☒		☒
11	2013	Vision for Smart Grid Controls.	11		☒		☒			☒		☒	☒	☒											
12	2014	Best practices of rural electrification in developing countries: Technologies and case studies.	12										☒		☒										

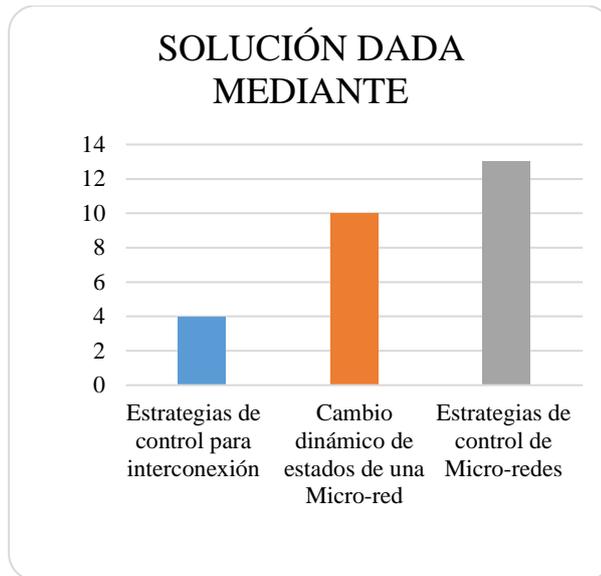




**Figura 20.** Resumen e indicador de temática



**Figura 21.** Indicador de formulación de problema



**Figura 22.** Indocador de solución