

**DISEÑO Y MODELADO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO CON REDES DE
PETRI PARA EL CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO

**TEMA:
DISEÑO Y MODELADO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO CON REDES DE
PETRI PARA EL CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA**

**AUTOR:
RENATO ALEJANDRO VARAS DÍAZ**

**DIRECTOR:
LEONY ORTIZ MATOS**

Quito, 28 de Febrero del 2015

DECLARATORIA DE AUTORÍA:

Yo, Renato Alejandro Varas Díaz autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 30 de Octubre del 2014

.....
Renato Alejandro Varas Díaz

CC: 1400650931

AUTOR

CERTIFICA:

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la monografía, así como el funcionamiento del “DISEÑO Y MODELADO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO CON REDES PETRI PARA EL CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA” realizada por el Sr. Renato Alejandro Varas Díaz, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 28 de Febrero del 2015

.....

Leony Ortiz Mato

DIRECTOR

DEDICATORIA.

Renato Alejandro Varas Díaz
Este tesis va dedicada a mi madre que es el sueño de ella verme graduado
A mi hija que es la luz y esperanza de mi vida
A mi director de tesis que ha sido un gran apoyo en esta tesis
A Dios que nunca me ha abandonado
Y a todos los profesores de la Universidad Politécnica Salesiana

Contenido

ÍNDICE DE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
ASPECTOS TEÓRICOS DE CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA	2
1.1 Circuitos Eléctricos Monofásicos	2
1.2 El Factor de Potencia o $\text{Cos}\phi$	4
1.2.1 Ventajas de la corrección del factor de potencia.....	7
1.2.2 Formas de elevación del factor de potencia ($\text{Cos}\phi$)	8
1.2.3 Reducción del consumo de energía reactiva sin la aplicación de equipos compensadores o controladores	8
1.2.4 Reducción del consumo de energía reactiva con la aplicación de equipos compensadores o controladores.....	9
1.3 Significado de la compensación en redes de alimentación.....	10
1.3.1 Selección entre la compensación fija o automática.....	10
1.4 Control automático del factor de potencia	11
1.4.1 Las principales ventajas que proporciona el empleo de controles automáticos.....	13
1.5 Compensación automática	13

1.6	Cálculo de la capacidad de los bloques de condensadores.....	15
CAPÍTULO II.....		18
DISEÑO, SIMULACIÓN Y VALIDACION DEL CONTROLADOR AUTOMÁTICO DEL FACTOR DE POTENCIA, MEDIANTE CONMUTACIONES DE BANCOS DE CONDENSADORES		
2.1	Esquema en bloque del módulo controlador del factor de potencia.....	18
2.2	Diseño del controlador mediante grafos de Petri Net, simulación en el software VisObjNet	20
2.2.1	Simulación del esquema en bloque del módulo controlador de factor de potencia.....	41
2.3	Simulación y validación del controlador automatizado en Petri Net en el software Matlab	49
CAPÍTULO III		60
ANÁLISIS DEL MÓDULO AUTOMATIZADO PARA CONTROLAR EL FACTOR DE POTENCIA A PARTIR DE CONMUTACIONES DE BANCOS DE CONDENSADORES		
3.1	Análisis vectorial de las señales generadas en el controlador a partir de las muestra de tensión y corriente tomadas de la instalación	60
CAPÍTULO IV		70
GUÍA PARA REALIZAR LA PRÁCTICA DE LABORATORIO		
4.1	Ejercicios para la realización de la práctica en la PC.....	71
CONCLUSIONES.....		77
RECOMENDACIONES.....		78
REFERENCIAS.....		79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Triangulo de Potencias	5
Figura 1.2. Diagrama de un control de factor de potencia	12
Figura 1.3. Control de la Potencia Reactiva	15
Figura 2.1. Diagrama de bloque controlador factor de potencia	19
Figura 2.2. Representation de bloques utilizados en Petri Net	21
Figura 2.3. Diagrama secuencial	27
Figura 2.4. Diagrama condicional	28
Figura 2.5. Diagrama iteración	28
Figura 2.6. Diagrama paralelo	28
Figura 2.7. Diagrama compartición de recursos	29
Figura 2.8. Diagrama sincronizacion.	29
Figura 2.9. Diagrama de relaciones	29
Figura 2.10. Diagrama de almacenamiento	30
Figura 2.11. Diagrama Fifo	30
Figura 2.12. Diagrama ciclo de maquina	31
Figura 2.13. Módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri	33
Figura 2.14. Inicio de sistema módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri	34
Figura 2.15. Etapa de medición módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri	35
Figura 2.16. Etapa de cálculo del factor de potencia módulo automático de redes de Petri	37
Figura 2.17. Etapa de corrección módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri	38
Figura 2.18. Etapa de conmutación módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri	39
Figura 2.19. Etapa de verificacion módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri	40
Figura 2.20. Diagrama de flujo módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri	43
Figura 2.21. Grafico explicativo de control de condensadores mediante redes de Petri	48
Figura 2.22. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso1.	50
Figura 2.23. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso2.	51
Figura 2.24. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso3.	51
Figura 2.25. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso4.	52
Figura 2.26. Verificación de etapa de medición mediante toolbox Matlab paso5.	53
Figura 2.27. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso6.	53
Figura 2.28. Verificación de cálculo de fp mediante toolbox matlab paso1	55
Figura 2.29. Verificación de cálculo de fp mediante toolbox matlab paso2	55
Figura 2.30. Verificación de cálculo de fp mediante toolbox matlab paso3	56
Figura 2.31. Verificación de cálculo de fp mediante toolbox matlab paso4	56
Figura 2.32. Verificación comprobación y correccion	58

Figura 3.1. Desfase entre voltaje y corriente prueba de laboratorio uno	61
Figura 3.2. Comprobación de medición red de Petri prueba de laboratorio uno	62
Figura 3.3. Comprobación cálculos de factor de potencia mediante red de Petri prueba de laboratorio uno. 63	
Figura 3.4. Comprobación de factor de potencia mediante red de Petri prueba de laboratorio uno	63
Figura 3.5. Comprobación corrección de factor de potencia laboratorio uno.....	65
Figura 3.6. Desfase entre voltaje y corriente prueba de laboratorio dos.....	65
Figura 3.7. Comprobación de medición red de Petri prueba de laboratorio dos.....	66
Figura 3.8. Comprobación cálculos de factor de potencia mediante red de Petri prueba de laboratorio dos. 67	
Figura 3.9. Comprobación de factor de potencia mediante red de Petri prueba de laboratorio dos.....	67
Figura 3.10. Comprobación corrección de factor de potencia laboratorio dos	69
Figura 4.1. Esquema eléctrico para la realización de la práctica de laboratorio.....	71
Figura 4.2. Circuito eléctrico para la realización de la práctica de laboratorio	73
Figura 4.3. Esquema eléctrico para la realización de la práctica de laboratorio.....	75
Figura 4.4. Esquema eléctrico para la realización de la práctica de laboratorio.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Factor Multiplicidad.....	7
--------------------------------------	---

DISEÑO Y MODELADO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO CON REDES DE PETRI PARA EL CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA

Renato Alejandro Varas Díaz
rvaras@est.ups.edu.ec
Universidad Politécnica Salesiana

Resumen—Esta tesis tiene como finalidad crear el Diseño y Modelado de un Sistema de Red de Petri para el Control del Factor de Potencia en sistemas monofásicos, el diseño de la Red de Petri se lo realiza utilizando una herramienta informática llamada VisualObjectNet, que sirve para estructurar sistemas estocásticos de control utilizando conocimientos de Redes de Petri que necesitan cuatro elementos básicos con los que definen los sistemas estocásticos, estos elementos son los Lugares, Arcos, Transiciones y Toquens, el mismo sistema es verificado y corrido Matlab que es una herramienta matemática utilizada en asuntos o temas de ingeniería y al mismo tiempo utilizamos una comprobación del sistema práctico en laboratorio, proponiendo con esta tesis un nuevo sistema para la corrección de factor de potencia enfocada a los sistemas monofásico.

Índice de Términos— Redes de Petri, Factor de Potencia, Control Automático, Matlab, Visual, Evaluación de sistema, corrección.

DESIGN AND MODELING OF A SYSTEM AUTOMATIC WHIT PETRI NETS FOR CONTROL OF POWER FACTOR

Renato Alejandro Varas Díaz
rvaras@est.ups.edu.ec
Polytechnical University Salesiana

This thesis is intended to create the design and modeling of a system Petri Net Control Power Factor in single phase systems, the design of the Petri net it is done using a software tool called VisualObjectNet, used to structure systems stochastic control using knowledge of Petri Nets need four basic elements that define the stochastic systems, these elements are the places, Arc, Transitions and Toquens, the same system is checked and run in Matlab is a mathematical tool used in topics or engineering topics while a test of practical use in the laboratory system, this thesis proposing a new system for power factor correction focused on the single phase systems.

Index Terms- Petri Nets, Power Factor, Automatic Control, Matlab, Visual, Evaluation system, correction.

INTRODUCCIÓN

Haciendo el análisis de la necesidad de implementar nuevos diseños de control para la enseñanza de disciplinas como Circuitos Eléctricos y Mediciones que cuenten con controladores automáticos del factor de potencia que permitan hacer demostraciones mediante modelos que complementen las actividades necesarias para el desarrollo del aprendizaje, además la corrección del factor de potencia es una problemática global que nos ha llevado a tener pérdidas constantes en el uso de la energía y el corregirla en pequeños sistemas hace que tengamos que hacer mediciones y análisis repetitivos para poder corregirla al momento de incrementar o disminuir cargas, haciendo de esto un gasto más en el consumo energético, señalando así la necesidad de crear una aplicación con Petri Net para el diseño de un módulo de control automático para el factor de potencia, aplicable en prácticas de laboratorios sobre el control de factor de potencia monofásico, desarrollando a la vez la necesidad de la investigación del modelado y diseño de un sistema automático con Redes Petri para el control del factor de potencia que es un avance al desarrollo del teórico práctico de materias como Circuitos y Mediciones Eléctricas orientadas al control de factor de potencia. Este trabajo tiene como objetivo elaborar el diseño de un sistema automatizado de control destinado a las prácticas en laboratorios enfocados a este tema en particular de la UPS, en el estudio se brinda los fundamentos teóricos en los que se apoya el tema desarrollado y se realiza una caracterización para el factor de potencia, así como, conceptos y definiciones importantes en los circuitos eléctricos. También se brinda la propuesta de diseño de circuitos para realizar prácticas de laboratorios de control de factor de potencia. Se realiza el análisis y la validación de los resultados obtenidos a través de simulaciones en programas informáticos existentes como Matlab,

CAPÍTULO I

ASPECTOS TEÓRICOS DE CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Este capítulo brinda una breve descripción de los Circuitos eléctricos $1\emptyset$, así como conceptos y definiciones de algunos de los elementos que lo conforman. También explica el modo práctico de elevar del factor de potencia y las ventajas de la corrección, contiene por otro lado los diferentes tipos de control. Además explica la reducción del consumo de energía sin aplicar equipos de compensación y aplicando equipos de compensación o controladores automáticos explicando el significado de la compensación del factor de potencia en redes o sistemas eléctricos. También contiene el cálculo de la capacidad de los bloques de condensadores que corrigen dicho factor de un sistema monofásico que lleva a conclusiones más sólidas y concisas para el ahorro energético.

1.1 Circuitos Eléctricos Monofásicos

Se conoce como corriente eléctrica, al movimiento dirigido y ordenado de partículas con carga desde un punto de mayor potencial a uno de menor potencial. Si a través de la sección de un conductor circula un infinitesimal de carga de dq durante de tiempo de dt segundos, la cantidad de electricidad que pasa por dicha sección del conductor durante ese infinitesimal de tiempo se denomina también corriente eléctrica, la unidad de medida es en Ampere y es la división de la variación de carga para la variación de tiempo.[1]

Se denomina corriente alterna a la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente. La forma de onda de la corriente alterna es sinusoidal. En el uso coloquial, "corriente alterna" se refiere a la forma en la cual la electricidad llega a los hogares y a las empresas.[1]

Se denomina corriente monofásica a la que se obtiene de tomar la alimentación de una fase y el conductor neutro.[1]

Diferencia de potencial o tensión en un campo eléctrico es por definición: el trabajo o energía necesaria para mover una carga eléctrica de un punto a otro en contra o a favor de las fuerzas del campo donde esta se encuentra. [1]

La conductividad eléctrica es conocida como la propiedad de los materiales que cuantifica la facilidad con que las cargas pueden moverse cuando un material es sometido a un campo eléctrico. [1]

La resistencia eléctrica: Es una propiedad inherente a los elementos y no es más que la oposición que experimentan al paso de la corriente. En un circuito eléctrico la resistencia R es un elemento pasivo que obedece a la relación tensión-corriente dada por la ley de Ohm, de forma tal que es igual al voltaje dividido para la corriente y que su unidad de medida es el ohm. [1]

El inductor es conocido como el elemento ideal de circuito que representa la propiedad que tienen algunos elementos circuítiles de almacenar energía en su campo magnético sin transformarla en otras formas de energía. Su propiedad fundamental es la inductancia que se interpreta como la relación entre la tensión inducida y las variaciones de la corriente que lo produce y su unidad de medida es el Henrios. [1]

El capacitor: ideal de circuito que representa la propiedad que tienen algunos elementos circuitales de almacenar energía en su campo eléctrico sin transformarla en otras formas de energía. Su propiedad fundamental es la capacitancia que se interpreta como la variación de la carga respecto a la variación de la energía necesaria para ponerla en movimiento su unidad de medida es el Faradio [1]

Circuito eléctrico: Es un grupo de elementos eléctricos conectados de una manera específica que interactúan entre sí para procesar energía en forma eléctrica. Cuando están

conectados en serie, o sea, que a través de ellos circula la misma corriente y en paralelo el a misma tensión. La Impedancia, de manera análoga a la Resistencia en corriente directa, es la propiedad de las ramas excitadas con corriente alterna a la oposición al paso de la corriente y relaciona la tensión de alterna aplicado entre sus terminales y la corriente que circula por ella mediante la Ley de Ohm generalizada que plantea que la impedancias es igual al voltaje dividido para la corriente en forma fasorial por tanto se expresa en Ohmios. Es la suma de una componente resistiva y una componente reactiva. [1]

La parte real de la impedancia es la Resistencia eléctrica y la parte imaginaria está asociada con la Reactancia, la cual no admite cambios bruscos de corriente por los inductores y para los capacitores no admite cambios bruscos de tensión. En el caso de los inductores se le denomina Reactancia inductiva denominada como X_L y para los condensadores, Reactancia capacitiva denominada de igual manera como X_C . Como ambas relacionan la tensión entre sus terminales y la corriente que circula a través de ellos, por la Ley de Ohm generalizada también se expresan en ohm. La reactancia total se calcula como $X = X_L - X_C$ esta relación expresada en la ecuación determina la naturaleza del circuito, si $X_L > X_C$ es predominantemente inductivo, si $X_L < X_C$, es predominantemente capacitivo y si $X_L = X_C$, es puramente resistivo. [2][3][4]

1.2 El Factor de Potencia o $\cos\phi$

Representa la relación entre la potencia activa y la aparente (Figura 1.1), por tanto, es como una muestra de la eficiencia en términos de uso de la energía. El ángulo ϕ representa en grados el desfasaje entre la tensión y la corriente, por tanto está asociado con el ángulo de la impedancia. El factor de potencia solo aparece en circuitos de corriente alterna, con cargas predominantemente inductivas o capacitivas y solo toma valores entre cero y uno. Mientras más cercano sea a la unidad mejor se aprovechará la energía ya que más energía aparente se convierte en activa, lo que indica menos pérdidas. [5][6]

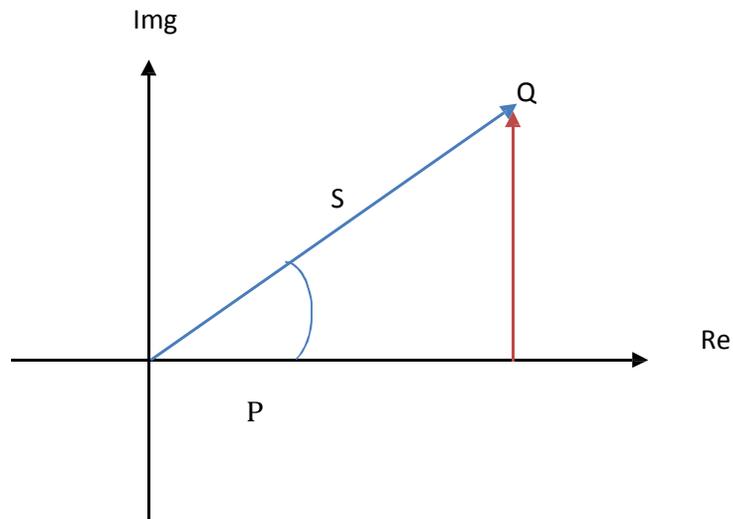


Figura 1.1. Triangulo de Potencias

Fuente: [3] E. S. Lincoln, Equipos de Protección Eléctrica y Corrección del Factor de Potencia, First Edition edition. Buenos Aires : Ediciones Librería del Colegio, 1950.

La potencia reactiva, la cual no produce un trabajo útil en los equipos pero es necesaria para el funcionamiento de elementos tales como motores, transformadores, lámparas fluorescentes y otros, puede volverse apreciable en una industria, y si no se vigila apropiadamente hace disminuir el factor de potencia. Un alto consumo de energía reactiva puede producirse como consecuencia principalmente de los siguientes casos.[7]

- Un gran número de motores.
- Una sub-utilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la industria.
- Un mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos.

Además se debe considerar que uno de los inconvenientes de un bajo factor de potencia trae consigo un efecto de incremento de las pérdidas por efecto joule y a su vez este trae consigo calentamiento de cables, calentamiento de bobinados de los transformadores de distribución disparo sin causa aparente de los dispositivos de protección. [8]

También es bueno conocer que uno de los mayores problemas que causa el sobrecalentamiento, es el deterioro irreversible del aislamiento de los conductores, que además de reducir la vida útil de los equipos, puede provocar cortos circuitos.[5]

Otro conocimiento importante es la sobrecarga de los generadores, transformadores y líneas de distribución que se considera al exceso de corriente debido a un bajo factor de potencia, ocasiona que los generadores, transformadores y líneas de distribución, trabajen con cierta sobrecarga y reduzcan su vida útil, debido a que estos equipos, se diseñan para un cierto valor de corriente y para no dañarlos, se deben operar sin que éste se sobrecargue.[5]

Aumento de la caída de tensión se reconoce a la circulación de corriente a través de los conductores que ocasiona una pérdida de potencia transportada por el cable, y una caída de tensión o diferencia entre las tensiones de origen y la que lo canaliza, resultando en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.); estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida.[5]

Esta caída de tensión afecta a los embobinados de los transformadores de distribución y en especial a los cables de alimentación, y a los sistemas de protección y control.[5]

El Incremento en la facturación eléctrica se efectúa debido a que un bajo factor de potencia implica pérdidas de energía en la red eléctrica, el productor y distribuidor de energía eléctrica se ve en la necesidad de penalizar al usuario, haciendo que pague más por su electricidad.[2]

Pero el aumento del calibre de los conductores y capacidad de los equipos de maniobras son un factor de potencia bajo comparado con otro alto, origina, para una misma potencia, una mayor demanda de corriente, lo que implica la necesidad de utilizar cables de mayor sección y la potencia aparente es tanto mayor cuanto más bajo sea el factor de potencia, lo que origina una mayor dimensión de los generadores, como se muestra en la Tabla 1.1.[5]

Tabla 1.1. Factor multiplicidad
 $\text{Cos}\phi$ Factor multiplicador de la

selección de cable	
1	1
0.80	1.25
0.60	1.67

Fuente: [3] E. S. Lincoln, *Equipos de Protección Eléctrica y Corrección del Factor de Potencia*, First Edition edition. Buenos Aires : Ediciones Librería del Colegio, 1950.

Esto es debido a que el $\text{Cos}\phi$ es inversa mente proporcional a la corriente como viene dada en la siguiente fórmula.[5][9]

$$I = \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{3} V \cos\phi} \quad (1)$$

1.2.1 Ventajas de la corrección del factor de potencia

De manera invertida, lo que no produce un efecto adverso produce una ventaja; por lo tanto, al corregir el factor de potencia a niveles más altos, nos da como consecuencia un menor costo de energía eléctrica. Al mejorar el factor de potencia no se tienen que pagar penalizaciones por mantener un bajo factor de potencia. [10]

También el aumento en la capacidad del sistema. Al mejorar el factor de potencia se reduce la cantidad de corriente reactiva que inicialmente pasaba a través de los transformadores, alimentadores, tableros y cables.[10][11]

La mejora en la calidad la tensión respecto un bajo factor de potencia puede reducir la tensión de la planta, cuando se toma corriente reactiva de las líneas de alimentación. Cuando el factor de potencia se reduce, la corriente total de la línea aumenta, debido a la mayor

corriente reactiva que circula, causando mayor caída de tensión a través de la resistencia de la línea, la cual, a su vez, aumenta con la temperatura. Esto se debe a que la caída de tensión en una línea es igual a la corriente que pasa por la misma multiplicada por la resistencia en la línea.[10]

- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores.
- Aumento de la vida útil de las instalaciones.

1.2.2 Formas de elevación del factor de potencia ($\text{Cos}\phi$)

El mejoramiento eficiente del factor de potencia en una instalación solo puede ser alcanzado a través de la correcta combinación de diferentes medios para su elevación, cada uno de los cuales debe ser técnica y económicamente fundamentado. Los medios para la elevación del factor de potencia pueden ser considerados dentro de los grupos generales siguientes:[12]

- Reducción del consumo de energía reactiva sin la aplicación de equipos compensadores.
- Reducción del consumo de energía reactiva con la aplicación de equipos compensadores.

1.2.3 Reducción del consumo de energía reactiva sin la aplicación de equipos compensadores o controladores

En primer lugar deben considerarse los medios para la reducción de la demanda de potencia reactiva sin la aplicación de medios compensadores, por cuanto para su ejecución, en términos generales no se requieren grandes inversiones capitales. A ellos pertenecen los siguientes.[12]

- Ordenamiento del proceso tecnológico.
- Sustitución de los motores asincrónicos subcargados por otros de menor potencia.
- Reducción de la tensión en los motores que sistemáticamente trabajan con poca carga.
- Limitación del trabajo de los motores en vacío.
- Sustitución de motores asincrónicos por motores sincrónicos.
- Elevación de la calidad de la reparación de los motores.
- Sustitución de los transformadores subcargados.

1.2.4 Reducción del consumo de energía reactiva con la aplicación de equipos compensadores o controladores

Para la compensación de la potencia reactiva, en general pueden utilizarse tres tipos de elementos compensadores.

- Condensadores estáticos
- Compensadores sincrónico.
- Motores sincrónicos

Actualmente el uso de los condensadores estáticos se encuentra muy difundido debido a sus ventajas con respecto a otros elementos compensadores. Entre las ventajas se pueden mencionar:

- Pequeñas pérdidas de potencia activa, (0.0025 y 0.005) kW/kVAR.
- Simplicidad de explotación (por la ausencia de partes rotatorias).
- Simplicidad del montaje (pequeño peso).
- Para su instalación puede ser utilizado cualquier lugar seco.
- Bajo costo.
- Mantenimiento casi nulo.
- Igual o más alta confiabilidad, aunque son más sensibles a las fallas de cortocircuito y a tensiones superiores a la nominal.

Todo esto hace de los capacitores la forma más práctica y económica para mejorar el factor de potencia en las instalaciones.[13]

Entre las principales desventajas de su utilización se encuentran la dependencia de la potencia generada por ellos con la tensión y la poca solidez que averían fácilmente todos los equipos electromecánicos que están constituidos por devanados o bobinas, tales como motores y transformadores necesitan la denominada corriente reactiva para establecer campos magnéticos necesarios para su operación.[12][14]

1.3 Significado de la compensación en redes de alimentación

La corriente reactiva produce un desfase entre la onda de tensión y la onda de corriente, si no existiera la corriente reactiva la tensión y la corriente estarían en fase y el factor de potencia sería la unidad. Esta es la causa por la cual se pide a los consumidores o usuarios mantener un factor de potencia cercano a la unidad. Los usuarios con una alta demanda de potencia reactiva son equipados con contadores de potencia reactiva. El desfase entre las ondas de tensión y corriente, producido por la corriente reactiva, se puede reducir sencillamente colocando condensadores en paralelo a los consumidores de potencia inductiva QL, lo que hace que el funcionamiento del sistema sea más eficaz y, por lo tanto, requiera menos corriente lo que técnicamente se denomina compensación.[12]

La corriente en los conductores se reduce, por lo que disminuyen las pérdidas. Así se ahorran los costos por consumo de potencia reactiva facturada por las centrales eléctricas.[12]

Con la compensación se reduce la potencia reactiva y la intensidad de la corriente, quedando la potencia real constante, es decir, se mejora el factor de potencia.[12]

1.3.1 Selección entre la compensación fija o automática

Para la selección entre una compensación fija o automática se deben evaluar dos aspectos muy importantes en el sistema que son la variación de la carga y la necesidad de limitar la

resonancia con la reactancia de la instalación.[12]

En el primer caso es válido decir que solo se justifica la compensación fija en aquellos casos en que los requerimientos de reactivo varíen poco en el tiempo lo cual es válido para la conexión individual de los capacitores ya sea en transformadores o motores. Solo en raras ocasiones una instalación en su conjunto presenta una demanda de reactivo estable. En sentido general la carga eléctrica varía con mayor profundidad a medida que se pasa a los escalones superiores del esquema de suministro por lo que la conexiones centralizada y en grupos generalmente se realiza de forma automatizada.[12]

En el segundo caso, se recomienda la compensación fija cuando la potencia de los capacitores no exceda, aproximadamente, el 15 % de la capacidad del transformador, con lo que se limitan problemas de resonancia y se reducen las pérdidas cuando trabaja en vacío.[12]

1.4 Control automático del factor de potencia

Este es el control utilizado para mantener el factor de potencia dentro de ciertos límites, es decir, si al variar la carga este sobrepasa los límites deseados, el control ordena la desconexión de bloques de condensadores que suministran un reactivo determinado para que el factor de potencia esté nuevamente en rango.[15]

A la hora de realizar este control se debe tener en cuenta la existencia de una zona inestable en la que cualquier operación que se realice, ya sea conexión o des conexión, provoca la oscilación del control. Observamos en la siguiente figura el diagrama de carga para el cual la diferencia entre la potencia reactiva máxima y mínima es igual a la capacidad del primer bloque de condensadores, lo que permite conocer el punto límite entre la zona inestable y la zona estable. Se tienen dos triángulos de potencias .[15]

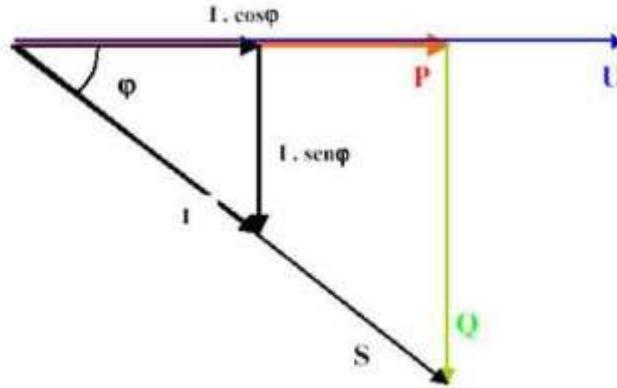


Figura 1.2. Diagrama de un control de factor de potencia.

Fuente: [11] N-Channel MOSFET Cambio rápido de 13 A a 500 V. .

$$\tan \phi_1 = \frac{Q_1}{P_x} \quad (2)$$

$$\tan \phi_2 = \frac{Q_c}{P_x} \quad (3)$$

Despejando y sustituyendo se obtiene:

$$P_x = \frac{Q_c}{\tan(\phi_1 - \phi_2)} \quad (4)$$

Donde:

P_x : es el valor de la potencia activa en el punto límite de estabilidad explicado en el párrafo anterior.

ϕ_1 y ϕ_2 Son ángulos que definen la línea de factor de potencia máximo y mínimo

En el anexo anterior el punto A representa una carga; si ésta aumenta, disminuye el factor de potencia, y al llegar a la línea de factor de potencia mínimo o de conexión, se conecta el primer bloque de condensadores; si la carga continúa aumentando, ahora en el punto B y

llega a la línea conexión conectará el próximo bloque; este ciclo se repite hasta conectar el último bloque. Si por el contrario, a partir del punto Del consumo de potencia reactiva inductiva comienza a disminuir, entonces el factor de potencia aumenta hasta llegar a la línea de factor de potencia máximo o desconexión, donde es desconectado un bloque y así sucesivamente[5]

1.4.1 Las principales ventajas que proporciona el empleo de controles automáticos

Un controlador automático para la corrección del factor de potencia, permite fácilmente que se pueda saber de la energía que recibe su sistema en el preciso instante de la medición, y además permite que se pueda hacer control automático de la energía reactiva.[12][16]

- Evitar sobretensiones para cargas ligeras.
- Proveer regulación de tensión.
- Reducir las pérdidas en el sistema con cargas ligeras al quedar conectados los capacitores.
- Evitar inestabilidad de los generadores.
- Evitar sobrecargas en los circuitos

1.5 Compensación automática

Un equipo de compensación automático debe ser capaz de adecuarse a las variaciones de potencia reactiva de la instalación para conseguir mantener el $\cos\phi$ objetivo de la instalación.[12]

Además está constituido por 3 elementos principales:

- El regulador que tiene la función de medir el $\cos\phi$ de la instalación y dar las órdenes a los contactores para intentar aproximarse lo más posible al $\cos\phi$ objetivo, conectando los distintos escalones de potencia reactiva.

- Los contactores que como elementos de cierre y a apertura son los encargados de conectar los distintos condensadores que configuran la batería. El número de escalones que es posible disponer en un equipo de compensación automático depende de las salidas que tenga el regulador
- Los condensadores que tienen la finalidad como elementos que aportan la energía reactiva a la instalación. Normalmente la conexión interna de los mismos está hecha en triángulo.

Los elementos externos que para para el funcionamiento de un equipo de compensación automático, es necesaria la toma de datos de la instalación; son los elementos externos que le permiten actuar correctamente al equipo:[16]

- La lectura de intensidad que debe conectar un transformador de intensidad que lea el consumo de la totalidad de la instalación.
- La lectura de tensión que normalmente se incorpora en la propia batería de manera que al efectuar la conexión de potencia de la misma ya se obtiene este valor. Esta información de la instalación (tensión e intensidad) le permite al regulador efectuar el cálculo del $\cos \phi$ existente en la instalación en todo momento y le capacita para tomar la decisión de introducir o sacar escalones de potencia reactiva.
- Regulación física que conocemos al escalonamiento o regulación física de una batería automática indica la composición y el número de los conjuntos condensador-contactador que la forman. Normalmente se suele expresar como relación de la potencia del primer escalón con el resto de escalones.

1.6 Cálculo de la capacidad de los bloques de condensadores

Para la corrección automática del factor de potencia necesitamos datos iniciales del sistema a corregir como la potencia real del circuito, el factor de potencia inicial, frecuencia y voltaje rms de la red.[12]

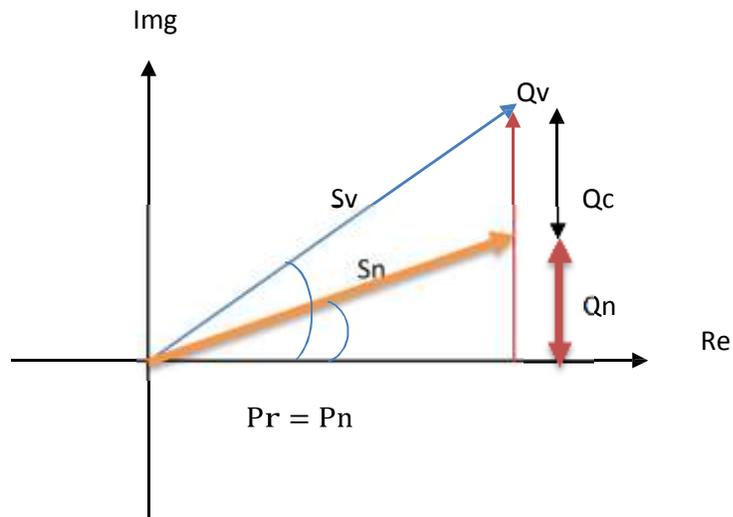


Figura 1.3. R. Barreto, Control de la Potencia Reactiva: para una mas eficiente distribucion de energia electrica. Sudbury, Mass.: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, p. 38.

Fuente: Autor

Para la corrección automática del factor de potencia necesitamos datos iniciales del sistema a corregir como la potencia real del circuito, el factor de potencia inicial, frecuencia y voltaje rms de la red.

Conociendo el factor de potencia actual y sabiendo a cuanto deseamos corregir el nuevo F.P se sabe lo siguiente.

$$F. P_r = \cos(\phi_r) \quad (5)$$

$$F. P_n = \cos(\phi_n) \quad (6)$$

Sabiendo que las fórmulas de potencia son las siguientes.

$$S = P + jQ \quad (7)$$

$$P = S \cos \phi_F \quad (8)$$

$$Q = S \sin \phi_F \quad (9)$$

Entonces:

$$S = \frac{P}{\cos \phi_r} \quad (10)$$

$$Q = \frac{P}{\cos \phi_r} \sin \phi_r \quad (11)$$

$$Q_r = P \tan \phi_r \quad (12)$$

$$S = \frac{P}{\cos \phi_n} \quad (13)$$

$$Q = \frac{P}{\cos \phi_n} \sin \phi_n \quad (14)$$

$$Q_n = P \tan \phi_n \quad (15)$$

Entonces la compensación es Q_c

$$Q_c = Q_r - Q_n \quad (16)$$

$$Q_c = P \tan \phi_r - P \tan \phi_n \quad (17)$$

$$Q_c = P(\tan \phi_r - \tan \phi_n) \quad (18)$$

Como: $C = \frac{mV_{rms}^2}{Q_c} \quad (19)$ y $m = 2nf \quad (20)$

La capacitancia será:

$$C = \frac{Q_c}{mV_{rms}^2} \quad (21)$$

$$C = \frac{P(\tan \phi_r - \tan \phi_n)}{2\pi f V_{rms}^2} \quad (22)$$

Con estas ultima formula llegamos a determinar que la corrección del factor de potencia viene dada por la potencia reactiva que debemos compensar.[12]

CAPÍTULO II

DISEÑO, SIMILACIÓN Y VALIDACION DEL CONTROLADOR AUTOMÁTICO DEL FACTOR DE POTENCIA, MEDIANTE CONMUTACIONES DE BANCOS DE CONDENSADORES

Este capítulo brinda el diseño, simulación y validación del controlador automático del factor de potencia, mediante la conmutación de bancos de capacitores, en primera fase explica el diagrama de bloque del módulo controlador, que a su vez será simulado para luego ser diseñado en gafos de Petri Net y corridos en simulación en el Software VisObjNet. También se observa en gafo PN el modo pre- selectivo del banco de capacitores utilizado para la corrección del factor de potencia y las ventajas de la corrección, ya que tiene muchas posibilidades dependiendo el banco de capacitores. Además se visualiza ya el uso de los cálculos para la compensación del fp que usa el banco de condensadores y este cálculo a su vez es validado en la herramienta matemática de Matlab que nos dice el valor total de la compensación en capacitancia para el esquema en bloque del módulo controlador del factor de potencia .

2.1 Esquema en bloque del módulo controlador del factor de potencia

La compensación del factor de potencia directamente viene dada por un módulo automático elabora en redes de Petri pero para mayor comprensión se logra explicarlo mediante un esquema de bloque en el cual nos explica el proceso de compensación mediante un banco de condensadores que será detallado más adelante en la siguiente figura.[17]

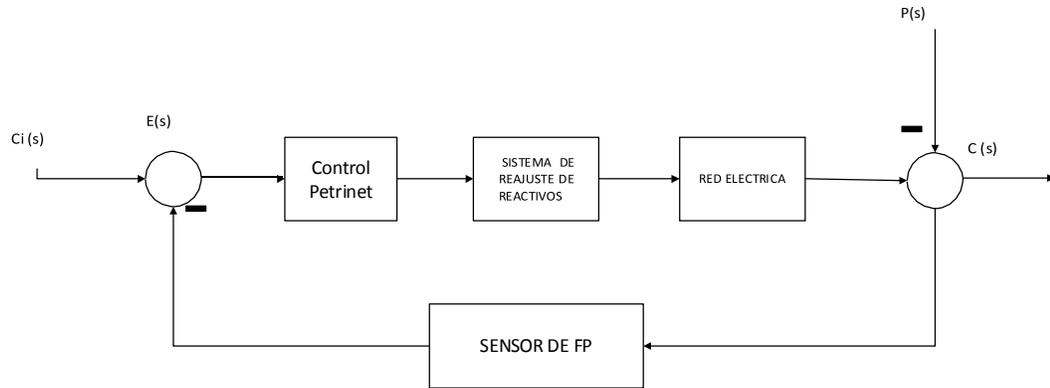


Figura 2.1. Diagrama de bloque controlador factor de potencia.

Fuente: [13] S. Umesh, L. Venkatesha, and A. Usha, “Active power factor correction technique for single phase full bridge rectifier,” 2014, pp. 130–135.

Como se observa en la figura, la energía ingresa al sistema y al mismo tiempo es aplicada una carga, con el control de redes de Petri se refleja la corrección necesaria para la corrección del factor de potencia, y pasa directamente a un sistema de reajuste de reactivos, para con el sensor inteligente volver a tener el factor de potencia deseado, para este sistema de reajuste de reactivos se tiene un banco de capacitores que serán conmutados o conectados según la configuración deseada dentro de la red de Petri.[18]

Dentro del proceso del sensado tenemos varios tipos de mediciones como el factor de potencia, la potencia activa en vatios, la potencia reactiva en vatios reactivos, y el voltaje rms de la red, con estos datos la red de Petri calcula y ajusta automáticamente la compensación necesaria para ajustar el sistema al factor de potencia que se cree deseado o más adecuado.[19]

En el control de la Petri net se encuentra la programación de la red de Petri, que inicia desde la energización del sistema la aplicación de la carga y todos los parámetros que deben ser considerados para lograr el objetivo propuesto de la corrección o compensación de reactivos.[20]

En el esquema el reajuste de reactivos simplemente representa la conmutación necesaria para la corrección después de que la red de Petri haya realizado su cálculo en el programa.

2.2 Diseño del controlador mediante grafos de Petri Net, simulación en el software VisObjNet

Antes del diseño del controlador mediante grafos de Petri Net, simulación en el software VisObjNet se debe reconocer claramente los elementos que conforman una red de Petri y las estructuras básicas de su control así como lo detallaremos a continuación de este párrafo.

Las Redes Petri son herramienta de representación gráfica y matemática de sistemas discretos que trabajan en concurrencia y permiten analizar y modelar las propiedades de cualquier sistema diseñado para trabajar en paralelo, permitiendo crear gráficamente un esquema que da por permitido la visualización de un sistema y simulación del mismo para proceder con la ejecución real. [21][22]

Las características estéticas de un gráfico tienen una gran influencia en el modo en el que se percibe y comprende el sistema al cual representa. Sin embargo, hay representaciones de sistemas para los que solamente se conoce la topología de interconexión. Los algoritmos de colocación gráfica automática permiten, dada la estructura topológica de un grafo, asignar a cada uno de sus elementos las coordenadas en el espacio que, de acuerdo a determinado criterio, optimizan su representación. El artículo muestra dos de los algoritmos de colocación más utilizados en los gráficos que se utilizan habitualmente para describir software, y explica cómo se han adaptado para su utilización con redes de Petri. [23]

Las Rede Petri fueron introducidas en 1962 por Carl Adam Petri y utilizadas en esencia para modelar sistemas discretos de distinta índole en la época, hoy en día existe una amplia gama de aplicaciones para el uso de las mismas como en el área productiva eléctrica e informática y está representada por diagramas compuestos por cuatro bloques que son las plazas, transiciones, arcos y toquen que son representados de la siguiente manera. [21]

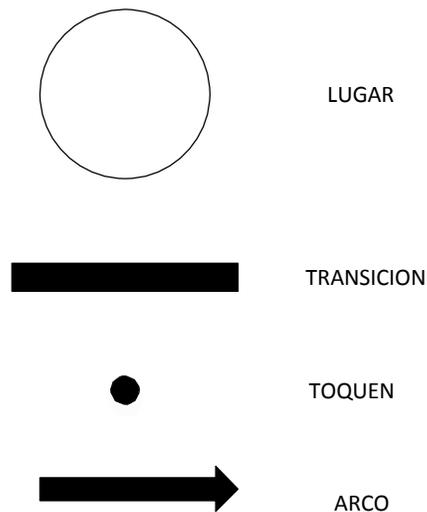


Figura 2.2. Representation de bloques utilizados en Petri Net.

Fuente: [17] W. Reisig, Understanding Petri Nets: Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies, 2013 editi. Berlin: Springer, 2013, p. 230.

Las plazas son las representaciones de los posibles estados por los que pueden pasar los sistemas y su símbolo es una circunferencia, todo espacio está relacionado con una acción que se ejecuta cuando el estado de dicho sistema representa la acción de dicho lugar, estos a su vez suelen tener un número de marcas positivo o nulo, permite la infinita representación de situaciones en un sistema de eventos discretos. [24][25][26]

Las Transacciones son las transiciones están representadas por rectángulos y es la parte lógica que hace posible los estados de un lugar del sistema u otro, cada una de las transiciones tiene asociados eventos que van según las reglas de evolución que establecen las redes Petri siempre y cuando las condiciones que componen un evento estén dentro de las mismas. [27][28]

Los arcos son líneas o mejor dicho flechas que nos permiten unir los lugares con las transiciones también de forma inversa, son unidireccionales y jamás pueden unirse entre sí según las reglas de las Petri net ya que va en contra del modelamiento matemático de las mismas, también tienen un peso que es la sintaxis que permite el flujo de los tokens que

representa la variaciones de los sistemas de eventos discretos y funcionan como limitadores que permite el paso de un estado a otro de los lugares de la red, además el arco representa la conexión y los posibles caminos o alteraciones de funcionamiento que permite la evolución del sistema. [29][30]

DEFINICIONES DE TERMINOS GENERALES

Sistemas.

Son rutinas sencillas o complejas en las cuales los componentes que los conforman tienen relación unos con los otros. [21]

Modelo.

Un modelo es la abstracción de un sistema real ya sea este implementado o investigado, eliminando las complejidades y haciendo suposiciones pertinentes; se aplica una técnica de modelación y se obtiene una representación simbólica del mismo.[22]

Simulación.

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple y entendible. [31]

Petri Net.

Es una herramienta de modelado gráfico y matemático que sirve para describir y estudiar sistemas complejos de uno o más de eventos discretos que pueden trabajar en concurrencia dentro de los sistemas los sistemas, es una herramienta poderosa para el control de sistemas complejos utilizados en casi todo ámbito.[21][32]

Matlab.

El Software Matlab es una de las herramientas informáticas que presenta diferentes prestaciones profesionales en el área de la matemática aplicada, las cuales pueden ser utilizadas en la representación, análisis y simulaciones de los controladores lógicos diseñados. [33]

Presenta un nuevo entorno de simulación de red de Petri para permitir modelado gráfico jerárquico, simulación híbrida, y la animación de los procesos en ciencias de la vida, y las aplicaciones técnicas, entre otros. Con el fin de modelar estas más diferentes procesos, un nuevo y potente universalmente utilizable modelado matemático. [34]

Visobjnet

El Software Visual Object Net 2.7a es una de las herramientas informáticas que presenta diferentes prestaciones profesionales en el área de la la representación, análisis y simulaciones de los sistemas concurrentes basados en variables discretas que nos permites diseñar en las Redes de Petri.[35]

Control

El control automático de procesos es parte del progreso industrial desarrollado durante lo que ahora se conoce como la segunda revolución industrial. El uso intensivo de la ciencia de control automático es producto de una evolución que es consecuencia del uso difundido de las técnicas de medición y control .Su estudio intensivo ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas. [21]

Validación

Describe un soporte de software para el modelado Petri net y basado síntesis control de supervisión Petri net que se desarrolló como una caja de herramientas para la ingeniería MATLAB populares herramienta computacional. La funcionalidad básica de la caja de

herramientas se describe y capacidades de análisis y síntesis se presentan a través de un ejemplo sencillo de la máquina de fabricación.[35]

En muchos sistemas de fabricación automatizados, varios dispositivos trabajan conjuntamente con las características de la sincronización, la concurrencia, el intercambio de recursos, y las secuencias cíclicas. El controlador lógico es un sistema de supervisión de eventos discretos que controla las secuencias paralelas y sincronizadas de las operaciones elementales de cada dispositivo para lograr el objetivo del sistema de fabricación automatizado. A pesar de que el controlador lógico es muy importante en el sistema de fabricación, aún no existe una herramienta integrada estándar, que es suficiente potente, versátil y fácil de usar, se puede implementar en la plataforma de tiempo real, y con la que es posible llevar a cabo el análisis formal de corrección además del enfoque tradicional de la validación a través de la simulación. En este trabajo un controlador lógico se presenta utilizando la red de Petri, que es una herramienta de modelado gráfica y matemática para describir.[35]

En resumen consistiría en el proceso de revisión que verifica que el sistema de software producido cumple con las especificaciones y que logra su cometido. Es normalmente una parte del proceso de pruebas de software de un proyecto, que también utiliza técnicas tales como evaluaciones, inspecciones y tutoriales. La validación es el proceso de comprobar que lo que se ha especificado es lo que el usuario realmente quería.[35]

Las Redes de Petri presentan infinidad de áreas de aplicación como son:

- La evaluación de rendimientos.
- Los protocolos de comunicación.
- El modelado y el análisis de sistemas de software distribuidos.
- Los programas paralelos y concurrentes.
- Los sistemas de control industrial.
- Los sistemas de eventos discretos.
- Los sistemas de memoria multiprocesador.

- Los sistemas tolerantes a fallas.
- Los sistemas operativos y compiladores.
- Los lenguajes formales.
- Las redes de área local.
- La inteligencia artificial.

Una Red de Petri, junto con su marcaje, se representa de forma matricial por medio de dos matrices.

Sea $|P| = n$ (números de lugares de la red) y sea $|t| = m$ (número de transiciones de la red).

Se denomina matriz de incidencia previa a la matriz:

$$C^- = [C_{ij}^-]_{n \times m} \quad (23)$$

Donde C_{ij}^- es el peso del arco del lugar i a la transición j .

Se denomina matriz de incidencia posterior a la matriz:

$$C^+ = [C_{ij}^+]_{n \times m} \quad (24)$$

Donde C_{ij}^+ es el peso del arco de la transición j al lugar i .

Es decir, en las matrices de incidencia, los lugares numeran las filas (i) y las transiciones las columnas (j), y cada elemento (i, j) expresa la incidencia que el lugar i tiene sobre la transición j .

La representación matricial de una Red de Petri se simplifica definiendo una única matriz

C denominada matriz de incidencia.

$$C = C^+ + C^- \quad (25)$$

La estructura de una Red de Petri ordinaria se puede representar por un vector en forma de cuádrupla como lo demuestra la siguiente ecuación:

$$PN = \{P, T, I, O\} \quad (26)$$

Donde:

$$P = \{P1, P2, P3, \dots \dots \dots, Pn\} \quad (27)$$

Y es un conjunto finito de lugares $n \geq 0$

$$T = \{T1, T2, T3, \dots \dots, Tm\} \quad (28)$$

Y es un conjunto finito de transiciones $m \geq 0$

$$I: P \rightarrow T \quad (29)$$

Es una función de entrada que define el conjunto de arcos dirigidos de P a T.

$$O: T \rightarrow P \quad (30)$$

Es una función de salida que define el conjunto de arcos dirigidos de T a P.

$$P \cap T = \emptyset \quad (31)$$

El marcaje de las Redes de Petri representa el comportamiento dinámico con ayuda de marcas. Un lugar puede tener cero, una o varias marcas representadas gráficamente por puntos dentro de los círculos que se denominan toquen. Una Red de Petri con marcas, recibe el nombre de Red de Petri marcada. El conjunto de lugares marcados en una red se denomina marcaje de la red y representa su estado en un instante dado. Se define el marcaje inicial como el conjunto de lugares marcados al inicio de una ejecución de la Red de Petri. El marcaje de una Red de Petri es una función del conjunto de lugares P al conjunto de los

enteros no negativos N .

$$\mu: P \rightarrow N \quad (32)$$

El marcaje μ también se define como un vector de dimensión n ,

Donde:

$$\mu = [(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)]^t \quad (33)$$

Para:
$$n = |P| \quad (34)$$

$$\mu_i \in N, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (35)$$

El vector μ asigna a cada lugar P_i en una Red de Petri el número de marcas en ese lugar. Una Red de Petri marcada de la siguiente manera:

$$(PNM) M = (PN, \mu) \quad (36)$$

Corresponde a una estructura $PN = (P, T, I, O)$ y un marcaje μ . También suele escribirse como: [36]

$$M = (P, T, I, O, \mu) \quad (37)$$

Las estructuras básicas para construcción de redes pueden ser repetitivas y usadas de manera indistinta en cada uno de los sistemas de control en los que utilice redes de Petri y son los siguientes:

Secuencial es una acción detrás de otra.



Figura 2.3. Diagrama secuencial.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Condicional es la alternativa donde la solución del conflicto lo dan los pseudoboxes.

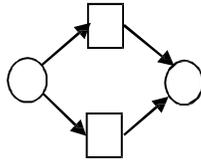


Figura 2.4. Diagrama condicional.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Iteración es la repetición de acciones hasta obtener el resultado deseado.

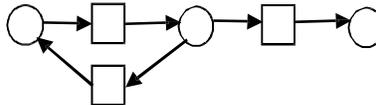


Figura 2.5. Diagrama iteración.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Paralela son las actividades que pueden realizarse al mismo tiempo o en cualquier orden de forma paralela.

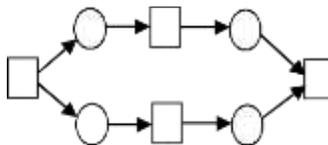


Figura 2.6. Diagrama paralelo.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Compartición de recursos o información son las que tienen dos procesos paralelos que comparten el uso de un equipamiento o información.

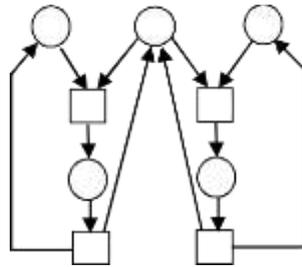


Figura 2.7. Diagrama compartición de recursos.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Sincronización son aquellas dos secuencias paralelas sincronizadas por una relación de pedido o reconocimiento.

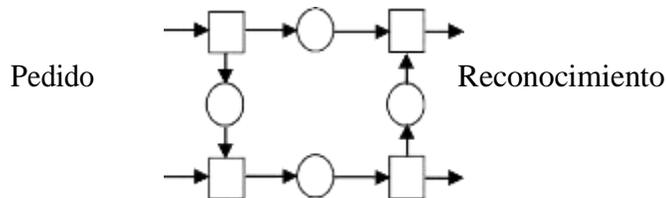


Figura 2.8. Diagrama sincronización.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Relación productor y consumidor son dos procesos paralelos donde la ejecución de una es condición para la otra y viceversa.

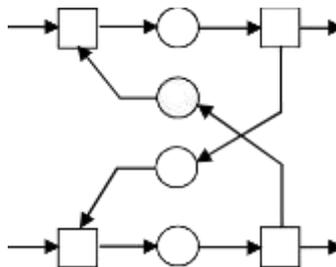


Figura 2.9. Diagrama de relaciones.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Las que no se pueden transformar a propias entonces se propone modelarlas en un bloque aparte de una entrada y una salida para aislar la “fuente de bloqueos” y preveer un algoritmo de control para resolver este problema.

Buffer que es el almacenaje limitado de una producción intermedia, donde la capacidad el bufer (k) es la capacidad del lugar de retorno inicializado a ese valor k.

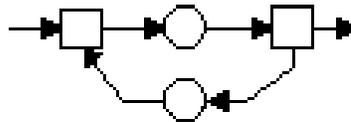


Figura 2.10. Diagrama de almacenamiento.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Pila FIFO que es la secuencia de Buffers como en el caso de una banda transportadora

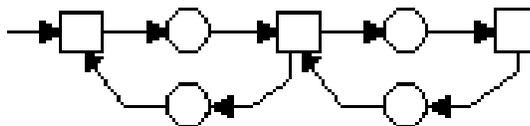


Figura 2.11. Diagrama Fifo.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Máquina que es la que puede alternar entre dos estados como en espera o en trabajando, pero puede además de estos dos estar descompuesta si el proceso no es fiable

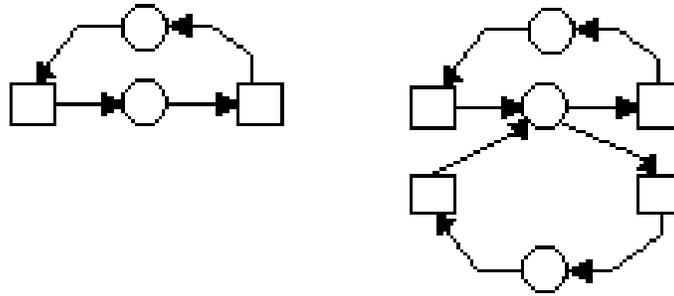


Figura 2.12. Diagrama ciclo de maquina.

Fuente: [32] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.

Pero estas estructuras son representadas de forma diferente al crear el Supervisor, pues no es necesario presentar la rotación de los dos o tres estados posibles sino como dos o tres condiciones que luego activan las acciones sobre el sistema asociadas a los lugares. Para esto se usan los seudoboxes simplificando las PN creadas. [37][38][32]

Utilizando estas estructuras se puede crear cualquier tipo de modelo de sistema automatizado utilizando redes de Petri.[27]

Ahora luego de la explicación de lo que son las redes de Petri y con la explicación de las estructuras básicas de la programación vamos a hacer la visualización del sistemas que simulara la corrección automática del factor de potencia mediante el uso de las redes de Petri, teniendo en cuenta los concepto básicos que estructuran el sistema como es necesario para la comprensión de cualquier análisis.[23][39]

Se desarrollará el modelado y diseño de un sistema automático con Redes Petri para el control del factor de potencia, dirigido a al desarrollo de esta investigación y con este trabajo se tiene como objetivo principal la elaboración del diseño de un sistema automatizado de control destinado a prácticas de laboratorios de control del factor de potencia.

En este estudio serán desarrollados los fundamentos teóricos antes ya explicados y se realizará la caracterización del factor de potencia, así como, conceptos y definiciones

importantes en los circuitos eléctricos aplicados con redes de petri. También se brindará la propuesta de diseño de circuitos para realizar prácticas de laboratorios de control del factor de potencia.

La necesidad de esta investigación surge en la Carrera de Ingeniería Eléctrica, donde se hace importante en la enseñanza de las disciplinas como Circuitos Eléctricos y Mediciones sistemas automatizados para corrección del factor del factor de potencia.

Por lo tanto esta aplicación con Petri Net, que permita el diseño de un módulo de control automático para el factor de potencia, aplicable en prácticas de laboratorios sobre el control de factor de potencia, tendría como tareas principales de la investigación, primeramente, la caracterización del factor de potencia en los circuitos eléctricos, la caracterización de las teorías de los circuitos eléctricos, el diseño de circuitos para realizar prácticas de laboratorios de control del factor de potencia, el diseño, modelado y simulación de modelos automatizados con Petri Net para el control del factor de Potencia.[40]

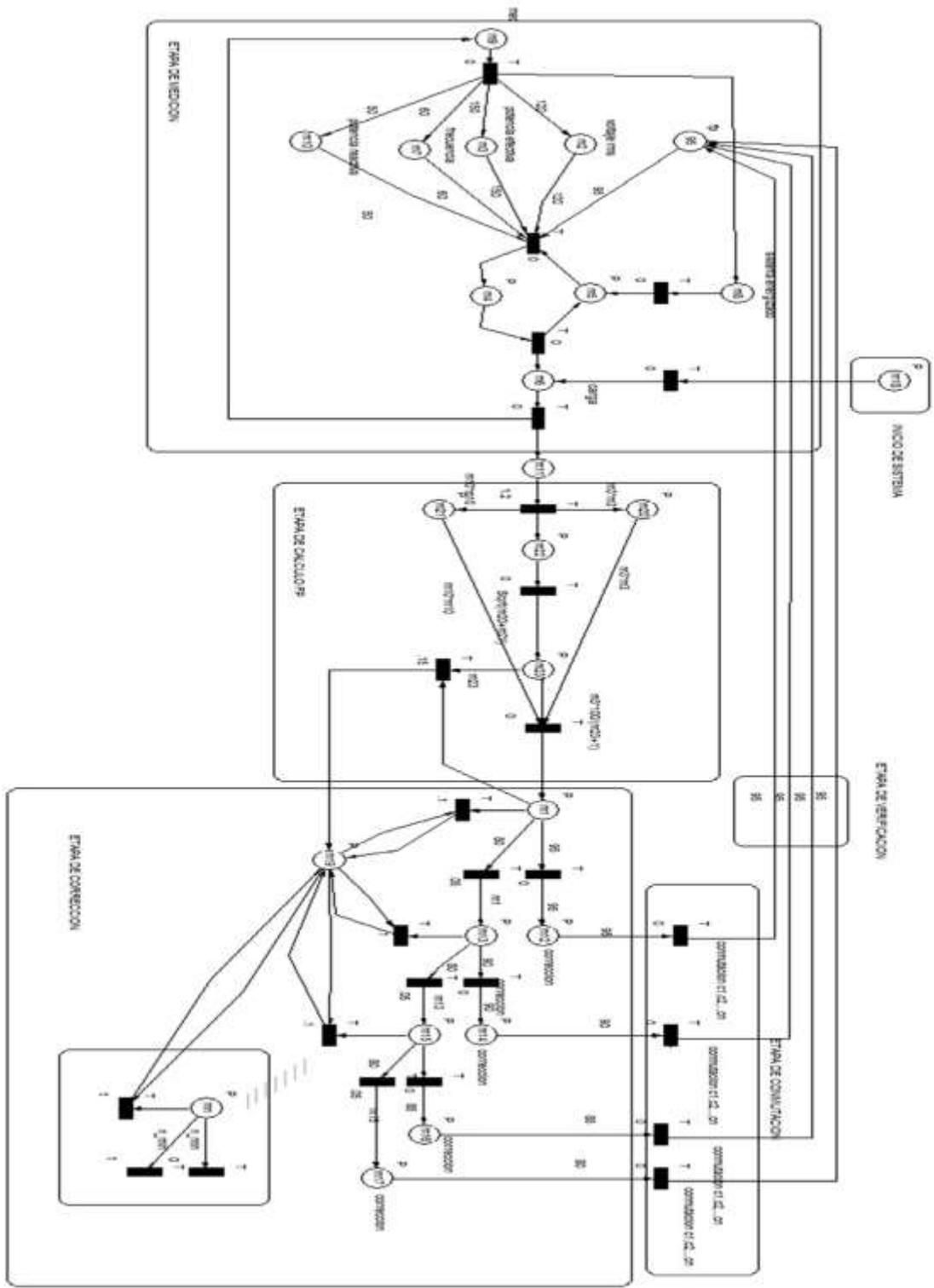


Figura 2.13. Módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri.

Fuente: Autor

Como en la red de Petri del sistema para la corrección del factor de potencia modelado en la página anterior podemos notar que esta sub dividido por recuadros que separan las distintas etapas del funcionamiento del proceso de corrección del factor de potencia mediante el uso de las redes de Petri, como mayor explicación lo iremos explicando individualmente cada uno de esto y para mejorar la visualización del sistema.

En las etapas claramente divididas por sub cuadros tenemos las siguientes:

PRIMERA ETAPA



Figura 2.14. Inicio de sistema módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri.

Fuente: Autor

Inicio de sistema

La Primera etapa la vamos a conocer como inicio de sistema que es la que nos dará el primer toque para pasar al ingreso de la carga es decir es el primer sub proceso que ejecuta el programa o sistema de red de Petri

Como explicación a este subproceso decimos que en el lugar que representa un inicio habrá un solo toque que permitirá pasar al siguiente o siguientes sub procesos que se ejecutaran en la red de Petri.

En palabra más entendibles para un técnico es primer punto de análisis es el inicio del programa, en explicación a esto debemos estar conscientes que para el inicio del programa debemos tener una carga conectada al sistema ya que de esta carga podremos revelar o leer los siguientes parámetros que serán necesarios para la corrección del factor de potencia que son la potencia activa y la potencia reactiva que serán consumidas por la carga.

rms , Potencia efectiva, Potencia Activa y Frecuencia, luego de esto vemos que como condición necesaria para pasar el toquen de ciclo de maquina es necesario un toquen que llegue desde el lugar llamado fp para poder volver a efectuar el ciclo.

En palabra más técnicas lo que se efectúa es la lectura de la carga, si nosotros no ingresamos una carga al sistema nunca podríamos decir que nuestro sistema está cerrado y existiría un flujo de corriente por la misma por lo tanto haría imposible la medición de las variables eléctricas necesarias para efectuar o elaborar algún tipo de cálculo que necesitemos conocer del sistema.

Luego de esto estamos efectuando la lectura del voltaje y la frecuencia, de igual manera que en caso anterior si nosotros no ingresamos una alimentación al sistema nunca podríamos decir que nuestro sistema está en funcionamiento por más que exista una carga y nunca existiría un flujo de corriente por la misma por lo tanto haría imposible la medición de las variables eléctricas necesarias para efectuar o elaborar algún tipo de cálculo que necesitemos conocer en el sistema.

Y por último en esta etapa estamos realizando la lectura de la Potencia Activa y la Potencia Reactiva que son variables eléctricas que nosotros necesitamos leer en el momento del ingreso de una carga para poder efectuar el cálculo del factor de potencia que será detallado a continuación de este caso ya analizado y además haría posible efectuar o elaborar algún tipo de cálculo que necesitemos conocer en el sistema.

TERCERA ETAPA

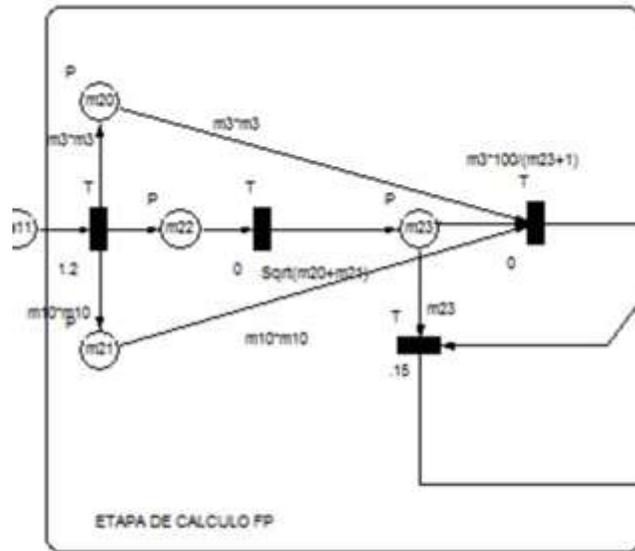


Figura 2.16. Etapa de cálculo del factor de potencia módulo automático de redes de Petri.

Fuente: Autor

Etapa de cálculo del factor de potencia

En esta etapa lo que se logra es realizar el cálculo del factor de potencia con el uso de las operaciones básicas que me brinda la red de Petri, así como se utiliza las variables eléctricas tomadas en la etapa de medición, como podemos ver primero se realiza los cuadrados de las potencias activa y reactiva para poder reutilizarlos en el cálculo que se almacena en m23, y luego poder pasar a la siguiente etapa.

Como parte técnica más detallada se puede decir que el modelos de análisis a ser programado es el cálculo del factor de potencia que para este cálculo es necesario analizar las lecturas de la potencia activa y reactiva que ya se realizaron en el cuarto caso de análisis a ser programado y viene dado el sistema como se muestra en la siguiente formula.

$$f_g = \frac{\text{Potencia } \mathcal{A}\text{ctiva}}{\sqrt{(\text{Potencia } \mathcal{A}\text{ctiva})^2 + (\text{Potencia Reactiva})^2}} \quad (38)$$

Seguido de esto analizamos que el factor de potencia siempre está dentro de un rango de desfase, es decir solo podrá estar entre 0 y 1 y cualquier otro tipo de medición llevaría a hacernos dar cuenta que se efectuaron mal los cálculos programados en el caso de análisis anterior o existió algún tipo de error en la programación.

Y este luego pasará por verificación del factor de potencia en la siguiente etapa ya sabiendo que se encuentra dentro del análisis de estudio y podremos calcularlo dentro del lenguaje de programación utilizando solo las operaciones matemáticas básicas.

CUARTA ETAPA

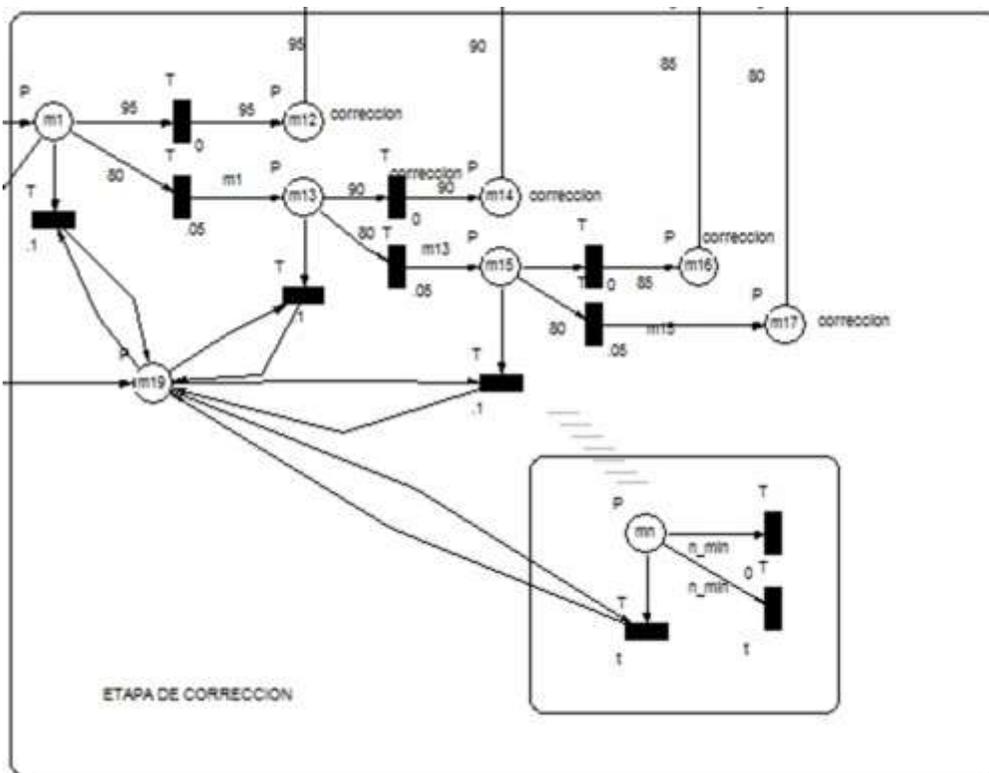


Figura 2.17. Etapa de corrección módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri.

Fuente: Autor

Etapa de Corrección

Como se puede observar a m1 ya nos llega el valor del factor de potencia y en esta etapa segura el programa o la red de Petri el camino más opcional para la rectificación del sistema.

En palabras más técnicas el análisis a ser programado es ya la verificación del factor de potencia ya sabiendo que se encuentra dentro del análisis de estudio y podremos calcularlo dentro del lenguaje de programación utilizando solo las operaciones matemáticas básicas.

El programa o red de Petri verifica los intervalos a ser analizados dentro del software por el programador o persona que aplicara este método a la corrección del factor de potencia, es decir nosotros podemos hacer intervalos de corrección cara 1% en el factor de potencia y además escoger el intervalo de corrección es decir puede corregirse desde el 1% al 100% del factor de potencia.

QUINTA ETAPA



Figura 2.18. Etapa de conmutación módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri.

Fuente: Autor

Etapa de conmutación

Como se puede en esta etapa existirá la conmutación o esta transición mandara a conectar los condensadores necesarios para la corrección del factor de potencia, esta conmutación estar programada por la persona que vaya a aplicar el sistemas en un caso específico de

corrección.

El análisis a ser programado en esta etapa luego del cálculo de los reactivos necesarios para la compensación del factor de potencia tenemos la conmutación de los condensadores de un banco de capacitores, que será la elección de los capacitores tomados en cuenta dentro de la programación, esto lo deberá elaborar en el momento de la programación para un caso específico de la programación de la corrección del factor de potencia para un sistema monofásico.

SEXTA ETAPA



Figura 2.19. Etapa de verificación módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri.

Fuente: Autor

Etapa de verificación

En esta etapa se verifica que se haya efectuado la corrección del factor de potencia para poder proceder nuevamente con la corrección del factor de potencia de la nueva carga ingresada.

El análisis a ser programado luego del cálculo de los reactivos necesarios para la compensación del factor de potencia y la conmutación de los condensadores de un banco de capacitores tenemos la corrección del factor de potencia que debe ser verificada por el sistema para la posible nueva corrección del factor de potencia de la siguiente medición de carga, ya que la carga puede ser dinámica y está variando constantemente los valores de potencia activa y reactiva dejando nuevamente la repetición del proceso para una nuevamente como se dijo antes posible corrección.

2.2.1 Simulación del esquema en bloque del módulo controlador de factor de potencia.

La simulación se explicará con el diagrama de flujo elaborado para facilitar la comprensión del diseño del controlador que se explicara en el siguiente sub capítulo, además es el esquema básico a seguir dentro del comportamiento de la red de Petri.

Antes que nada empezaremos con una explicación detallada del pseudocódigo del programa que será los pasos y procesos programados tanto en la red de Petri como en un diagrama de flujo. Dentro del pseudocódigo encontraremos el detalle del programa que más adelante será también explicado paso a paso.

Ya habiéndose detallado la parte más importante y explicado cómo se lograra comenzar con la explicación de la red de Petri podemos comenzar la explicación de los procesos o pasos a seguir así como comenzaremos a detallar que es el pseudocódigo y como esta estructurado dentro de la simulación de la corrección del factor de potencia mediante el uso de las redes de Petri.

El pseudocódigo además es la estructuración en este caso de un proceso de corrección del factor de potencia automático mediante pasos previamente analizados y que tienen lógica en el modelado del sistema a simular o correr antes de la programación y esta a su vez esta complementado por procesos que son tomados en cuenta desde la aplicación de carga y energización hasta la corrección y verificación de la misma.

Utiliza las convenciones estructurales de un lenguaje de programación real o procesos indistintos que lleven una lógica o pasos estructurados a seguir pero está diseñado para la lectura humana y fácil comprensión del sistema en lugar de la lectura mediante máquina compleja como lenguajes de programación de bajo y alto nivel, y además cuenta con la independencia cualquier otro lenguaje de programación.

Programación del pseudocódigo o proceso de comprensión humana sin lenguaje de máquina.

- Inicio
- Leer Carga
- Leer Voltaje y frecuencia (voltaje mayor que cero)
- Leer Potencia Activa y Reactiva
- Calcular Factor de Potencia
- Verificar $F_p \geq 0$ y $F_p \leq 100$
- Verifica Valor F_p
- Verificar intervalos de corrección
- Calculo de Corrección de potencia reactiva
- Conmutación de Condensadores
- Corrección del factor de potencia
- Verifica corrección del factor de potencia
- Fin

Ya habiendo presentado las líneas básicas de programación en el pseudocódigo se puede hacer la representación gráfica de la programación mediante un diagrama de flujo donde podremos simular o correr un flujo o programa previo a ser pasado o interpretado a un lenguaje de programación.

El diagrama de flujo se lo elabora en una herramienta de Microsoft Office llamada Visio y está diseñada precisamente para elaborar y correr diagramas de flujo o flujo gramas.

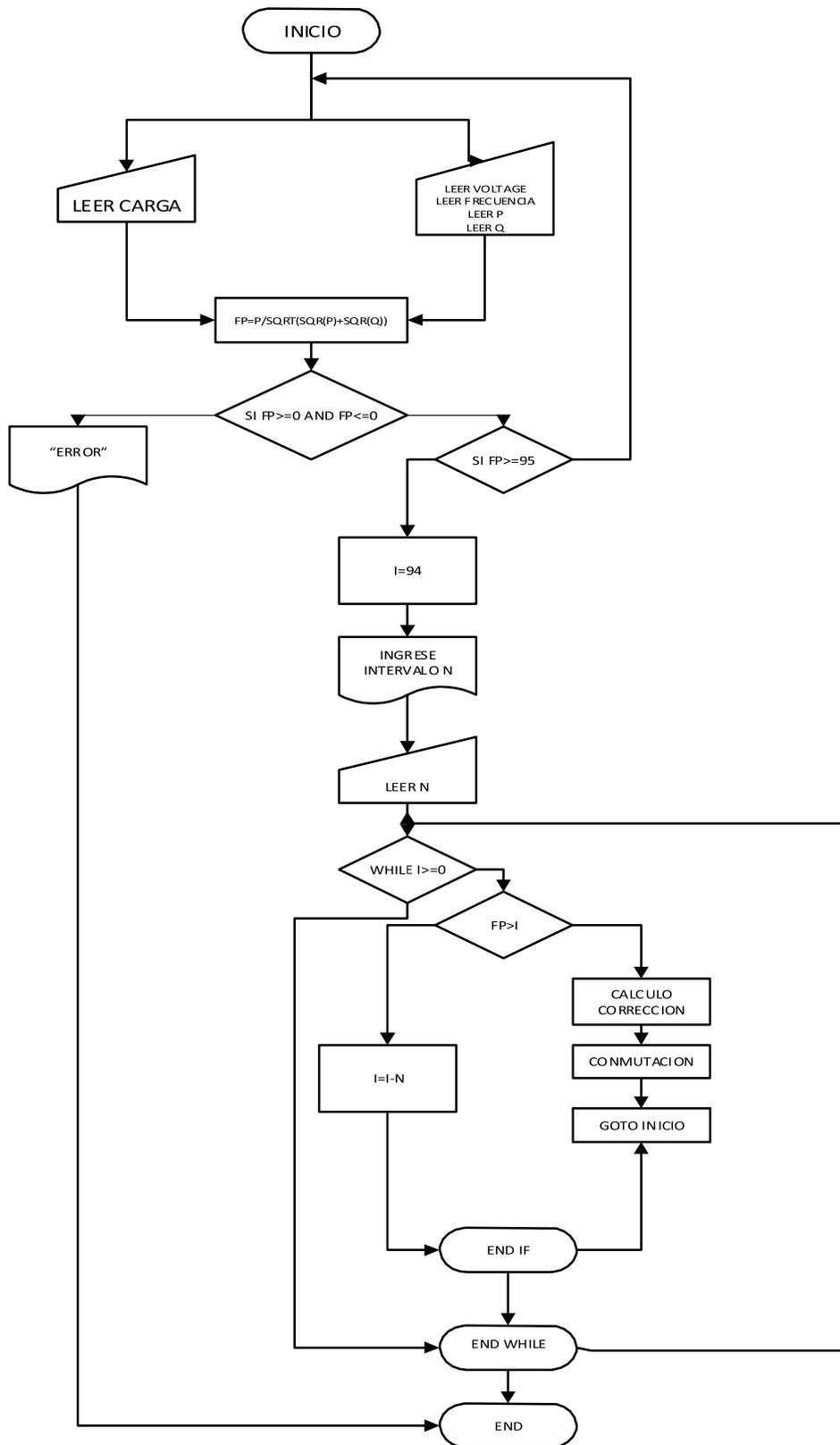


Figura 2.20. Diagrama de flujo módulo controlador del factor de potencia mediante redes de Petri.

Fuente: Autor

En la figura anterior el inicio corresponde a la aplicación del carga en el Sistema, luego de esta aplicación pasamos por la medición del factor de potencia y dependiendo de esto nos lleva a un condicional que en este caso sería si es mayor a 100% no ejecuta ninguna acción y si es menor ejecuta una compensación con la red de Petri. Pero aun así dentro del análisis se sabe que queda demasiadas preguntas e inconsistencias del nuevo análisis y método a utilizarse para la corrección del factor de potencia así que se explicara paso a paso el proceso del pseudocódigo mediante la red de Petri.

Como puntos principales de análisis tenemos varios factores a tomarse en cuenta puesto que son los básicos para que el software empiece sus cálculos, estos serán el factor de potencia que depende del tipo de carga a utilizarse y a su vez la energización es decir el voltaje y la frecuencia del sistema alimentado.

Empezando con el análisis del pseudocódigo y diagrama de flujo que fue diseñado a partir del mismo empezaremos con la explicación a detalle.

Inicio

El primer punto de análisis es el inicio del programa, en explicación a esto debemos estar conscientes que para el inicio del programa debemos tener una carga conectada al sistema ya que de esta carga podremos revelar o leer los siguientes parámetros que serán necesarios para la corrección del factor de potencia que son la potencia activa y la potencia reactiva que serán consumidas por la carga.

Leer Carga

En el segundo caso de análisis a ser programado es la lectura de la carga, si nosotros no ingresamos una carga al sistema nunca podríamos decir que nuestro sistema está cerrado y existiría un flujo de corriente por la misma por lo tanto haría imposible la medición de las variables eléctricas necesarias para efectuar o elaborar algún tipo de cálculo que necesitemos conocer del sistema

Leer Voltaje y frecuencia (voltaje mayor que cero)

En el tercer caso de análisis a ser programado es la lectura del voltaje y la frecuencia, de igual manera que en caso anterior si nosotros no ingresamos una alimentación al sistema nunca podríamos decir que nuestro sistema está en funcionamiento por más que exista una carga y nunca existiría un flujo de corriente por la misma por lo tanto haría imposible la medición de las variables eléctricas necesarias para efectuar o elaborar algún tipo de cálculo que necesitemos conocer en el sistema.

Leer Potencia Activa y Reactiva

En el cuarto caso de análisis a ser programado tenemos la lectura de la Potencia Activa y la Potencia Reactiva que son variables eléctricas que nosotros necesitamos leer en el momento del ingreso de una carga para poder efectuar el cálculo del factor de potencia que será detallado a continuación de este caso ya analizado y además haría posible efectuar o elaborar algún tipo de cálculo que necesitemos conocer en el sistema.

Calcular Factor de Potencia

En el quinto caso de análisis a ser programado es el cálculo del factor de potencia que para este cálculo es necesario analizar las lecturas de la potencia activa y reactiva que ya se realizaron en el cuarto caso de análisis a ser programado y viene dado el sistema como se muestra en la siguiente formula.

$$f_g = \frac{\text{Potencia } \mathcal{A}ctiva}{\sqrt{(\text{Potencia } \mathcal{A}ctiva)^2 + (\text{Potencia Reactiva})^2}} \quad (38)$$

Verificar $F_p \geq 0$ y $F_p \leq 100$

En el sexto caso de análisis a ser programado tomamos el análisis de que el factor de potencia siempre está dentro de un rango de desfase, es decir solo podrá estar entre 0 y 1 y cualquier otro tipo de medición llevaría a hacernos dar cuenta que se efectuaron mal los cálculos programados en el caso de análisis anterior o existió algún tipo de error en la programación.

Verifica Valor F_p

En el séptimo caso de análisis a ser programado es ya la verificación del factor de potencia ya sabiendo que se encuentra dentro del análisis de estudio y podremos calcularlo dentro del lenguaje de programación utilizando solo las operaciones matemáticas básicas.

Verificar intervalos de corrección

En el octavo caso de análisis a ser programado es la verificación de intervalos a ser analizados dentro del software por el programador o persona que aplicara este método a la corrección del factor de potencia, es decir nosotros podemos hacer intervalos de corrección para 1% en el factor de potencia y además escoger el intervalo de corrección es decir puede corregirse desde el 1% al 100% del factor de potencia.

Calculo de Corrección de potencia reactiva

En el noveno caso de análisis a ser programado es el cálculo de los reactivos necesarios para la compensación del factor de potencia que para este cálculo es necesario analizar las lecturas de la potencia activa y reactiva más el cálculo del f_p para analizar el condensador o conmutación de los mismos necesarios para corregir el sistema.

Estos análisis ya se realizaron en el cuarto caso de análisis a ser programado y viene dado el sistema como se muestra en la siguiente formula (21) y (22).

$$C = \frac{Q_c}{mV_{rms}^2}$$
$$C = \frac{P(\text{tag } \phi_r - \text{tag } \phi_n)}{2nf V_{rms}^2}$$

Conmutación de Condensadores

En el décimo caso de análisis a ser programado luego del cálculo de los reactivos necesarios para la compensación del factor de potencia tenemos la conmutación de los condensadores de un banco de capacitores, que será la elección de los capacitores tomados en cuenta dentro de la programación, esto lo deberá elaborar en el momento de la programación para un caso específico de la programación de la corrección del factor de potencia para un sistema monofásico.

Corrección del factor de potencia

En el onceavo caso de análisis a ser programado luego del cálculo de los reactivos necesarios para la compensación del factor de potencia y la conmutación de los condensadores de un banco de capacitores tenemos la corrección del factor que se da en el momento de conectar los condensadores a la carga.

Verifica corrección del factor de potencia

En el doceavo caso de análisis a ser programado luego del cálculo de los reactivos necesarios para la compensación del factor de potencia y la conmutación de los condensadores de un banco de capacitores tenemos la corrección del factor de potencia que debe ser verificada por el sistema para la posible nueva corrección del factor de potencia de

la siguiente medición de carga, ya que la carga puede ser dinámica y está variando constantemente los valores de potencia activa y reactiva dejando nuevamente la repetición del proceso para una nuevamente como se dijo antes posible corrección.

Fin

En el treceavo caso de análisis a ser programado y ultimo tenemos la finalización del programa.

Ahora luego de la explicación del pseudocódigo y el diagrama de flujo explicativo del sistema diseñado para mayor comprensión vamos a explicarlo con una figura explicativa que es una representación de las redes de Petri controlando el banco de condensadores.

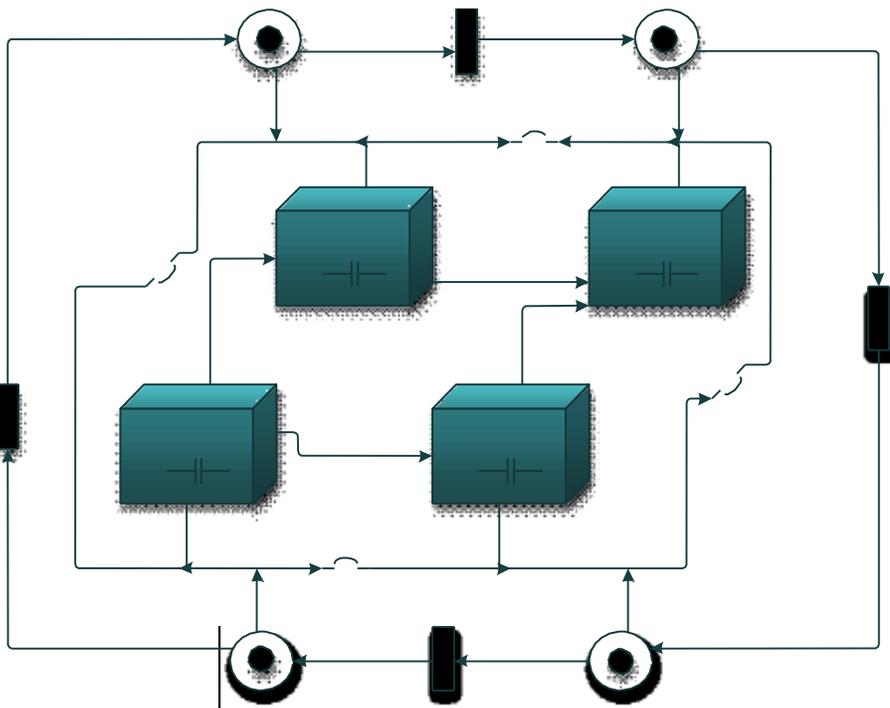


Figura 2.21. Grafico explicativo de control de condensadores mediante redes de Petri.

Fuente: Autor

En el gráfico anterior se puede observar los bancos de capacitores que son conmutados por interruptores que a su vez estos son controlados por una red de Petri representativa mas no es el diseño final, esta red de Petri como se puede observar está conformada por plazas, arcos transiciones y toquen. Los estados o plazas que están representados por círculos son los momentos que están esperando un evento en este caso la acción de las mediciones de voltaje, frecuencia, potencia activa y reactiva para luego enviar estos datos mediante los arcos que están representadas por flechas y envía en forma de los toquen que nos permite saber cuándo se ejecuta un cambio de estado por medio de una transacción, las transiciones son eventos o acontecimientos de ambiente externo que el sistema puede detectar como una señal interrupción o llegada de un paquete de datos para ejecutar una acción previo y pasar a un pos evento que ente caso vale repetirlo es la conmutación de los capacitores del banco de condensadores.

2.3 Simulación y validación del controlador automatizado en Petri Net en el software Matlab.

Para la simulación y validación del control automatizado en vamos a correr ciertas partes de la red de Petri en el Toolbox de matlab que aparte de ser una herramienta matemática que nos sirve para comprobar los cálculos también nos sirve para la simulación de ciertos análisis de las redes de Petri, estas partes para el programador se pueden considerar como las más importantes así que iremos corriéndolas paso a paso para comprobar que efectivamente nuestra red de Petri actúa como lo habíamos previsto y el mismo funcionamiento lo comprobara nuestra herramienta matemática.

Comenzaremos con la simulación de la primera etapa de la red de Petri conocida como la etapa de inicio y la etapa de medición, donde se ira explicado por pasos los procesos establecidos y considerados.

PRIMERA COMPROBACION

ETAPA DE INICIO Y ETAPA DE MEDICION

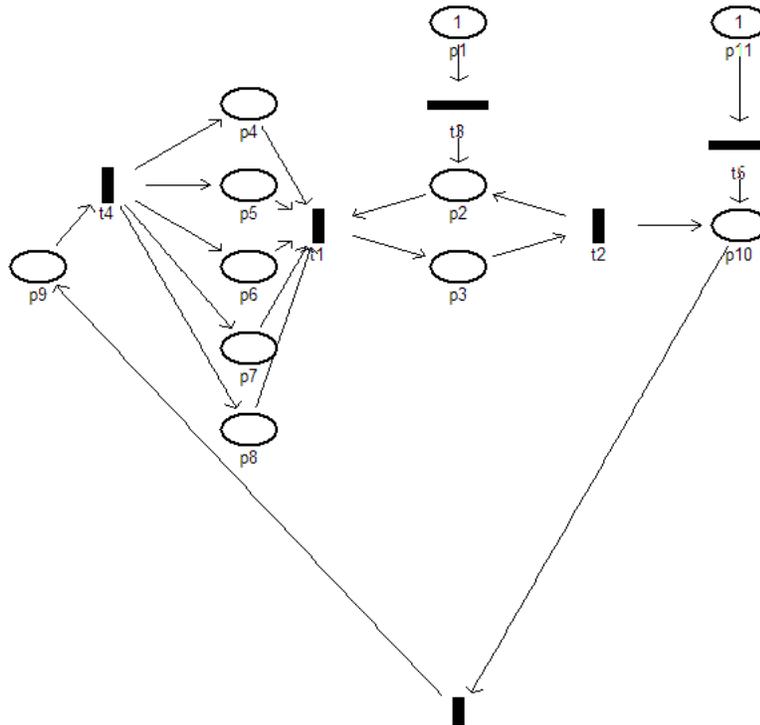


Figura 2.22. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso1.

Fuente: Autor

Como podemos ver en el grafo de la red de Petri solo tenemos nos toques inicialmente que representa el P11 para el inicio del sistema y el p1 que verifica el ciclo de máquina que es un lenguaje básico en la verificación de equipos en las redes de Petri. Como parte de la práctica en este estado nos damos cuenta que la carga aún no ha sido colocada en el lugar p10.

Así que hacemos análisis que aún no se puede generar la medición de potencia activa, reactiva, voltaje y frecuencia.

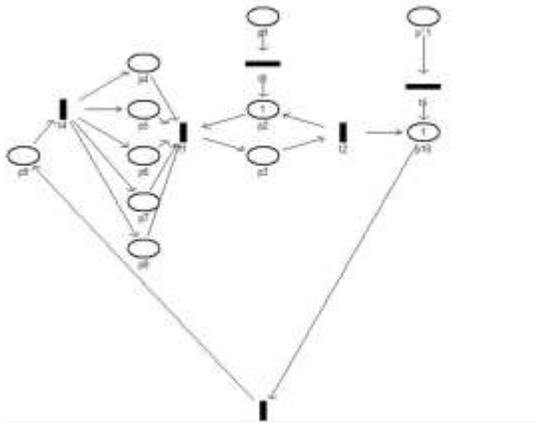


Figura 2.23. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso2.

Fuente: Autor

Para este siguiente caso de análisis de la red de Petri en la etapa de medición se logra visualizar que el ciclo de maquina ya esta activo con un token en el lugar p2, pero este token no podrá circular aun por que no se encuentran echas las mediciones de las variables eléctricas antes mencionadas así que la carga la fue aplicada también en el lugar p10 que se representa con un token. Seguido de esto podremos analizar el siguiente paso de nuestra simulación de red de Petri.

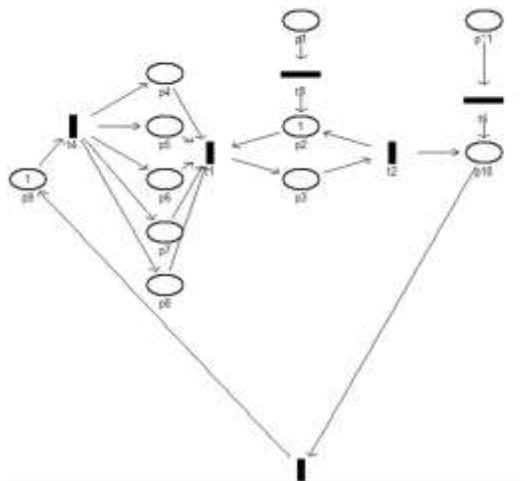


Figura 2.24. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso3.

Fuente: Autor

Como es de esperarse el sistema ya reconoció la carga aplicada en p10 como se visualizado en la gráfica anterior así que pasa al siguiente estado en p9 y el toque se encuentra listo para ejecutar la siguiente acción q es la medición de las variables eléctricas.

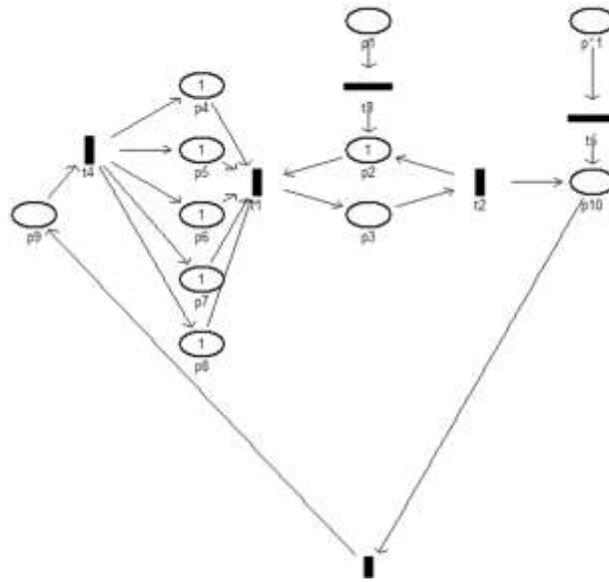


Figura 2.25. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso4.

Fuente: Autor

Ahora dentro del caso de análisis logramos visualizar que ya se efectuó la etapa de mediciones eléctricas como potencia activa, potencia reactiva, voltaje y frecuencia, sabiendo de esta manera que el sistema ya está energizado y que ya está aplicada la carga, dejando pasar todos estos datos al siguiente estado que sería la validación del ciclo de máquina. Como todos los valores necesarios ya se encuentra cargados para la medición en la otra etapa paralelo a esto se encuentra efectuando ya el cálculo del factor de potencia el mismo valor que servirá para proceder con la etapa de cálculo de corrección y conmutación, analizando de esta manera se visualiza que va cumpliendo con la red de Petri antes diseñada.

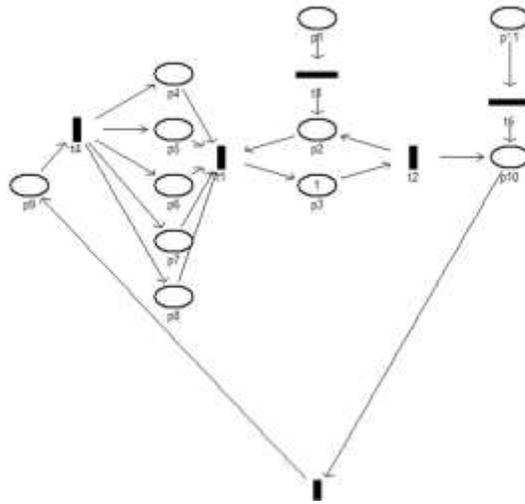


Figura 2.26. Verificación de etapa de medición mediante toolbox Matlab paso5.

Fuente: Autor

En el análisis vemos que ya una vez verificado los valores hemos llegado al estado de comprobación y este toquen estar listo para proceder nuevamente al estado de aplicación de carga para poder realizar nuevamente el ciclo repetitivo de la etapa de medición, cabe recalcar que al mismo tiempo se ejecuta la acción de las otras etapas no en su totalidad.

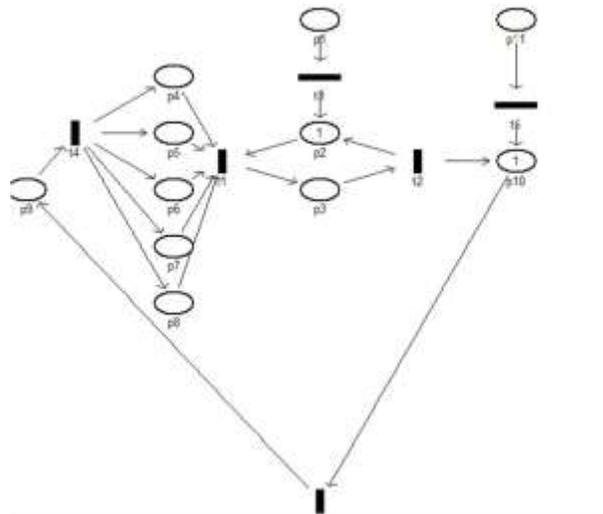


Figura 2.27. Verificación de etapa de medición mediante toolbox matlab paso6.

Fuente: Autor

Con este grafico logramos ver que el ciclo se vuelve repetitivo para la medición y es justamente lo que se había programado en la red de Petri con Visual Object Net 2.7ª obteniendo para once lugares y 6 transiciones en nuestro los modelos de matrices.

matriz_entrada =

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (39)$$

matriz_salida =

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (40)$$

matriz_indexada =

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (41)$$

SEGUNDA COMPROBACION

ETAPA DE CÁLCULO DEL FACTOR DE POTENCIA

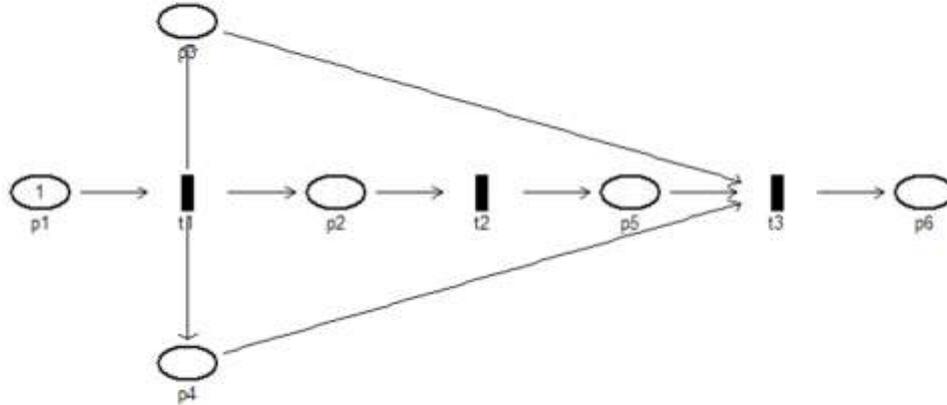


Figura 2.28. Verificación de cálculo de fp mediante toolbox matlab paso1.

Fuente: Autor

Haciendo énfasis en el cálculo de la corrección del factor de potencia, cabe recalcar que en la red de Petri se puede ejecutar operaciones básicas así que al ingresar el token e p1 efectúa tres acciones la transición 1.

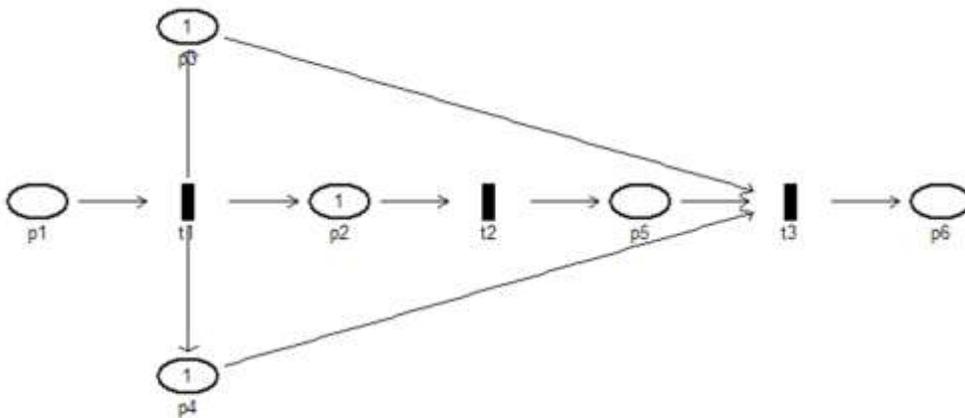


Figura 2.29. Verificación de cálculo de fp mediante toolbox matlab paso2.

Fuente: Autor

Primero se efectúa el cuadrado de las potencias activas y reactivas en p3 y p4 respectivamente, y en p2 se envía un toque para poder utilizar estos datos de p3 y p4.

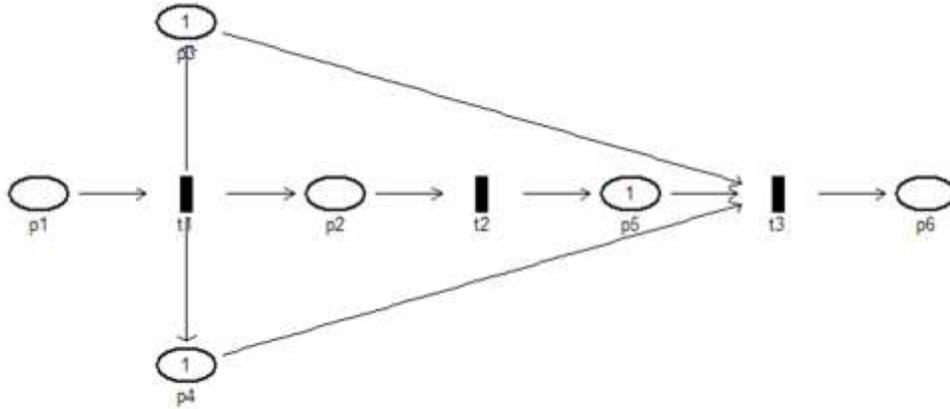


Figura 2.30. Verificación de cálculo de fp mediante toolbox matlab paso3.

Fuente: Autor

El toquen que estaba antes en p2 ejecuta la siguiente acción para que en p5 se cargue el valor del cálculo más elaborado para el cálculo final del factor potencia que será almacenado en p6.

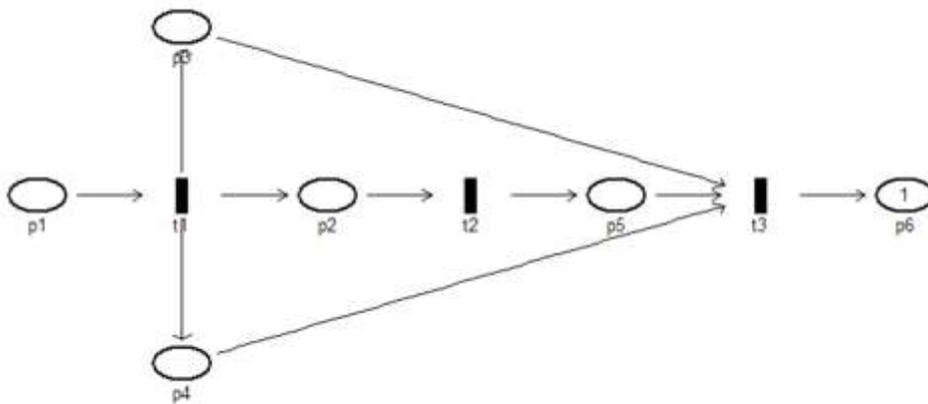


Figura 2.31. Verificación de cálculo de fp mediante toolbox matlab paso4.

Fuente: Autor

Como finalización de la etapa de cálculo de factor de potencia logramos visualizar que efectivamente el lugar p6 ha sido cargado con el valor de factor de potencia del sistema te siendo las siguientes matrices la simulación matemática del proceso.

matriz_entrada =

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (42)$$

matriz_salida =

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (43)$$

matriz_salida =

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (44)$$

TERCERA COMPROBACIÓN

ETAPA DE CÁLCULO CORRECCIÓN

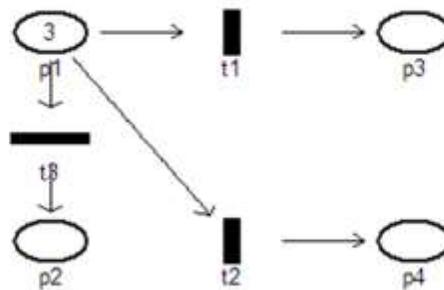


Figura 2.32. Verificación comprobación y corrección.

Fuente: Autor

La etapa de corrección solo consiste en la selección de los intervalos a corregir del factor de potencia del sistemas, es decir vamos a analizar solo uno de los condicionales creados para efectuar la selección, en este caso $p1$ es el valor del factor de potencia, si $p1$ sobrepasa el arco o el valor agregado del arco que conecta $p1$ y $t1$ efectuara la corrección saeteada dentro del lugar $p3$, caso contrario si $p1$ sobrepasa el valor del valor de factor de potencia sesteado pasara al lugar $p4$ en conde si se quiere más intervalos de corrección volverá a ejecutar un condicional de la misma manera y así podemos lograr un infinito número de posibilidades en los intervalos de corrección teniendo en cuanta que a partir de estas estructuras básicas he logrado conseguir un sistemas programado en while, y de caso de no cumplir la verificación del factor de potencia o no estar dentro de los límites que deseáramos corregir este valor será descargado a un lugar $p2$ que es un sistema de reseteo de $p1$ o también conocido como un lugar para poner en blanco nuevamente el sistema para la siguiente posible

medición. Además cabe recalcar que la próxima etapa no se las analizara por motivos de sencillez saeteadas en los pesos de arco.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DEL MÓDULO AUTOMATIZADO PARA CONTROLAR EL FACTOR DE POTENCIA A PARTIR DE CONMUTACIONES DE BANCOS DE CONDENSADORES

Este capítulo brinda un análisis del módulo automatizado o de la red de Petri comparado con muestras de laboratorio además del Análisis vectorial de las señales generadas en el controlador a partir de las muestra de tensión corriente factor de potencia que es de acuerdo a las cargas establecidas por los módulos de práctica del laboratorio de circuitos eléctricos y la validación del controlador automático del factor de potencia, mediante la conmutación de bancos de capacitores indicando la conmutación de condensadores necesarias para corregir estos pequeños sistemas simulados en el laboratorio con un el analizador monofásico ANF1 el uso de los cálculos para la compensación del factor de potencia explicados en detalle en capítulos anteriores, además se intentara usar de la mejor manera según la red de Petri el banco de condensadores y este cálculo a su vez es validado en la herramienta matemática de Matlab que nos dice el valor total de la compensación en capacitancia para el esquema en bloque del módulo controlador del factor de potencia .

3.1 Análisis vectorial de las señales generadas en el controlador a partir de las muestra de tensión y corriente tomadas de la instalación

En el análisis vectorial de las señales generadas en el controlador a partir de la muestra de tensión y corriente tomadas de la instalación de un circuito con cargar reactivas lograremos ver las señales en desfase de las variables eléctricas antes mencionadas así como el análisis fesorias de la corriente y voltaje antes y después de la corrección del factor de potencia.

DEFINICIONES DE TERMINOS GENERALES

Fasor.

Es la representación gráfica de una variable física eléctrica, en este caso de estudio analizaremos los fasores de voltaje y corriente.

Desfase.

Es el Angulo de desplazamiento existente entre el voltaje y la corriente, este puede ser en adelanto o retraso de tanto de voltaje como de corriente.

Triangulo de potencia.

Es la representación gráfica de las tres potencias existentes en una carga, en esta se representa la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente.

ANALISIS VECTORIAL EN PRUEBAS DE LABORATORIO UNO



Figura 3.1. Desfase entre voltaje y corriente prueba de laboratorio uno.

Fuente: Autor

En este análisis de laboratorio utilizamos el analizador ANF1 que nos permite visualizar la onda de voltaje tanto como de corriente dejándonos observar el desfase existente entre estas

dos señales eléctricas, además nos permite saber el valor de las cargas factor factor de potencia.

Para este primer caso de análisis consideramos una carga de $P=16.2W$ y $Q=16.6VA$ alimentadas a una fuente de $124.4V$.

En primer lugar analizaremos que el factor de potencia visualizado por el ANF1 coincida con el Factor de potencia calculado por nuestra red de Petri.

Así que simularemos nuevamente nuestra red de Petri con los valores tomados por el analizador y luego los compararemos para ver el análisis de los dos.

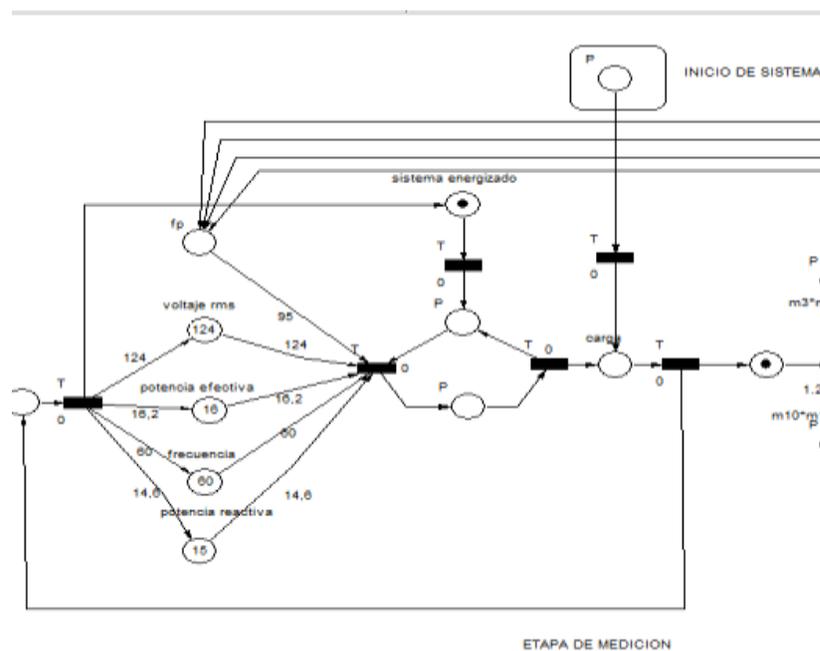


Figura 3.2. Comprobación de medición red de Petri prueba de laboratorio uno.

Fuente: Autor

Efectivamente vemos que los valores de la carga han sido cargado y aproximados al inmediato superior, por lo tanto vemos y comprobamos que la etapa de medición está corriendo perfectamente y ya envió el toque para el cálculo del factor de potencia que se efectúa en la etapa de cálculo.

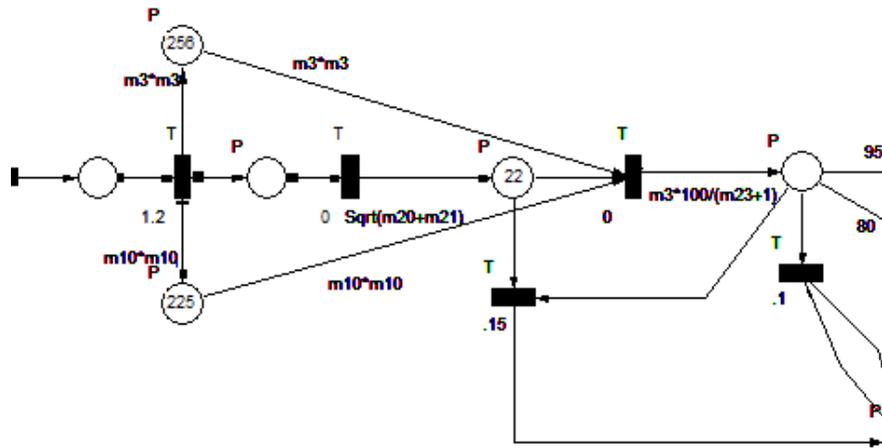


Figura 3.3. Comprobación cálculos de factor de potencia mediante red de Petri prueba de laboratorio uno.

Fuente: Autor

Ahora se visualiza que el toque que ingreso al cálculo cargo los valores de cálculo básicos para en el siguiente paso o step poder tener el valor exacto del factor de potencia calculado por la red de Petri.

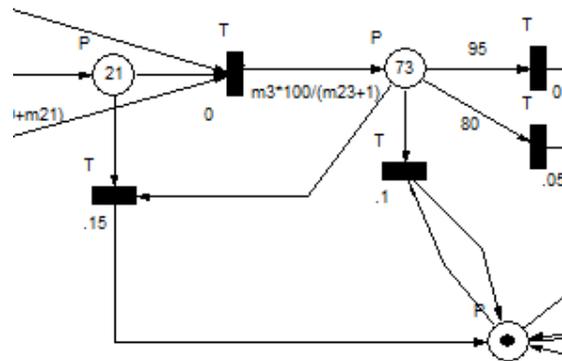


Figura 3.4. Comprobación de factor de potencia mediante red de Petri prueba de laboratorio uno.

Fuente: Autor

Así comprobando que el analizador y la red de Petri me da valores de cálculos casi parecidos al sistema real, fallando con una pequeña diferencia entre la realidad y el proceso simulado del 1% valor del factor de potencia, cabe hacer énfasis en que este error se debe a las aproximaciones obtenidas en la red de Petri, ya que solo trabaja con enteros, por tal motivo los números con decimales son aproximados se aproximan al inmediato superior o inferior según sea el caso.

En el siguiente caso sabemos debemos configurar a la red de Petri para que nos corrija un factor de potencia que en este caso sería 95%

Por lo tanto dentro de los caso de análisis y configuración de la corrección del factor de potencia debemos tener una corrección de $Q_c = 9.28 \text{ VAR}$ con un condensador o banco de capacitores conmutados de tal manera que el condensador total sea igual a $1.6 \mu\text{F}$ según cálculos de validación en Matlab.

CALCULO DEL CAPACITOR PARA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA MONOFASICO

Ingrese frecuencia del sistema en Hz: 60

Ingrese el voltaje Rms del sistema: 124.4

Ingrese Potencia real del sistema del sistema por favor: 16.2

Ingrese Potencia reactiva del sistema por favor: 14.6

El factor de potencia es: 0.742837964983181

Especifique a cuanto quiere la nueva corrección del fp: .95

La potencia reactiva a corregir es: 9.275317496102417

El capacitor que se necesita es de: 1.589852759754260e-06

Conociendo que en el laboratorio de circuito eléctricos de la Universidad Politécnica Salesiana no existe condensadores de esta capacidad se aplica condensadores o bancos de condensadores similares pero con valores no tan exactos y obtenemos la siguiente corrección del factor de potencia.

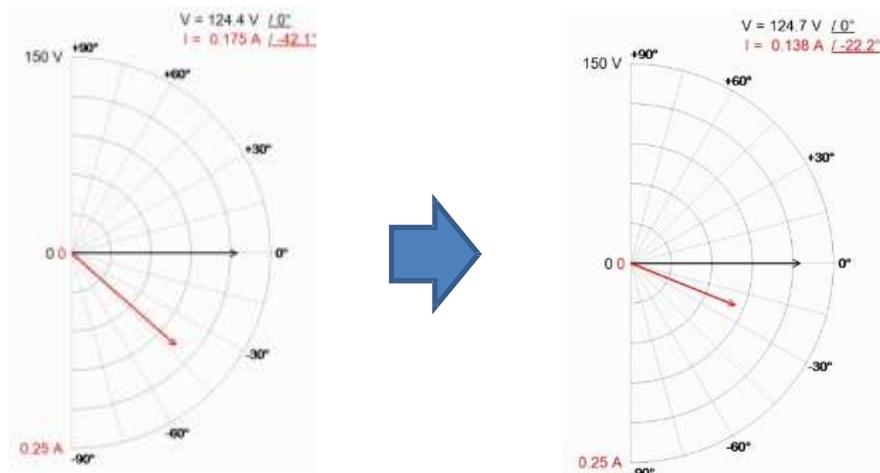


Figura 3.5. Comprobación corrección de factor de potencia laboratorio uno.

Fuente: Autor

Comprobando así la mejoría del factor de potencia no a su totalidad por motivos de instrumentos de laboratorio.

ANALISIS VECTORIAL EN PRUEBAS DE LABORATORIO DOS

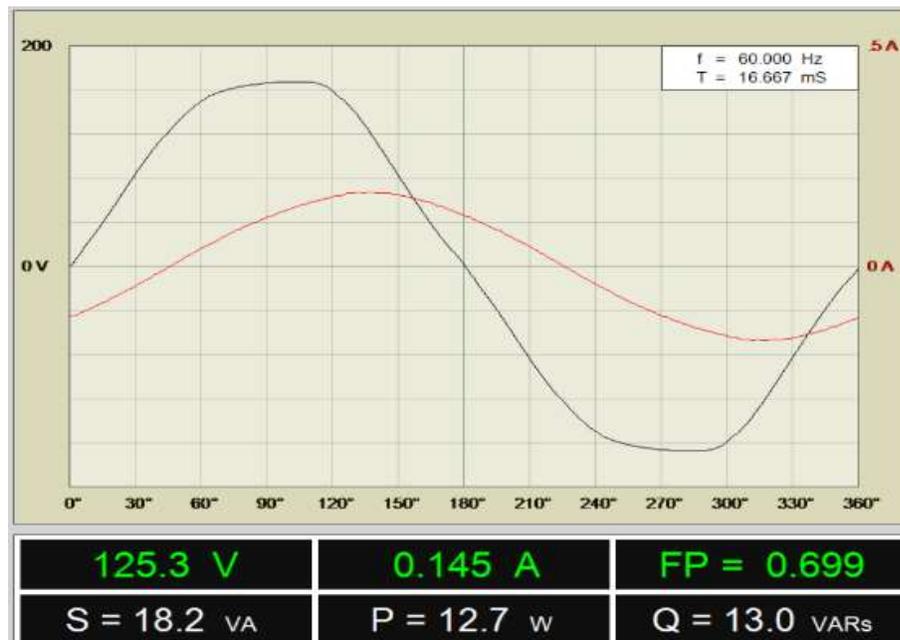


Figura 3.6. Desfase entre voltaje y corriente prueba de laboratorio dos.

Fuente: Autor

En este análisis de laboratorio utilizamos el analizador ANF1 que nos permite visualizar la onda de voltaje tanto como de corriente dejándonos observar el desfase existente entre estas dos señales eléctricas, además nos permite saber el valor de las cargas factor de potencia.

Para este primer caso de análisis consideramos una carga de $P=12.7W$ y $Q=13.0VA$ alimentadas a una fuente de $125.3V$.

En primer lugar analizaremos que el factor de potencia visualizado por el ANF1 coincida con el Factor de potencia calculado por nuestra red de Petri.

Así que simularemos nuevamente nuestra red de Petri con los valores tomados por el analizador y luego los compararemos para ver el análisis de los dos.

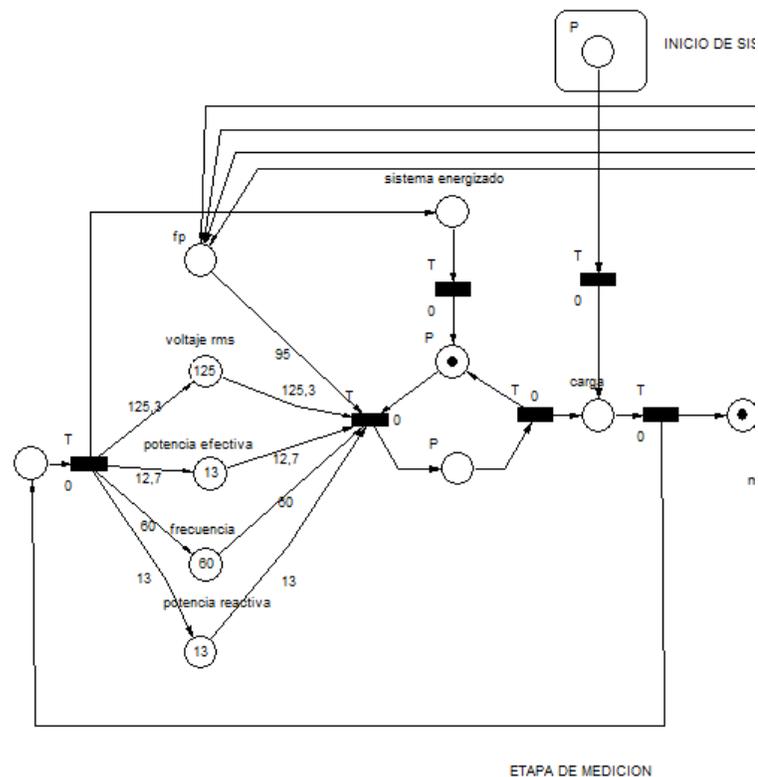


Figura 3.7. Comprobación de medición red de Petri prueba de laboratorio dos.

Fuente: Autor

Efectivamente vemos que los valores de la carga han sido cargados y aproximados al

inmediato superior, por lo tanto vemos y comprobamos que la etapa de medición está corriendo perfectamente y ya envió el toque para el cálculo del factor de potencia que se efectúa en la etapa de cálculo.

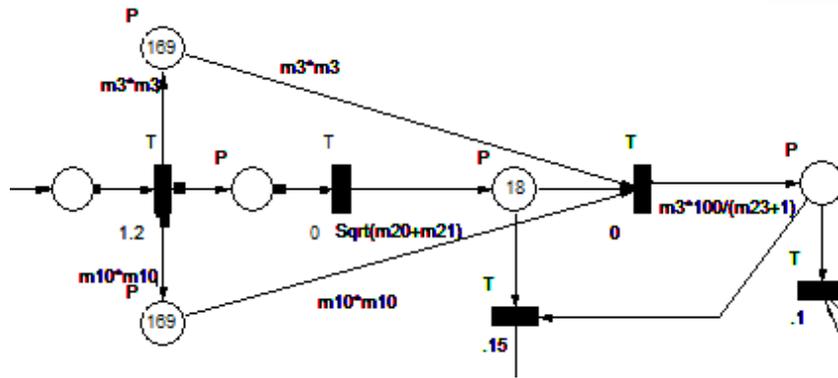


Figura 3.8. Comprobación cálculos de factor de potencia mediante red de Petri prueba de laboratorio dos.

Fuente: Autor

Ahora se visualiza que el toque que ingreso al cálculo cargo los valores de cálculo básicos para en el siguiente paso o step poder tener el valor exacto del factor de potencia calculado por la red de Petri.

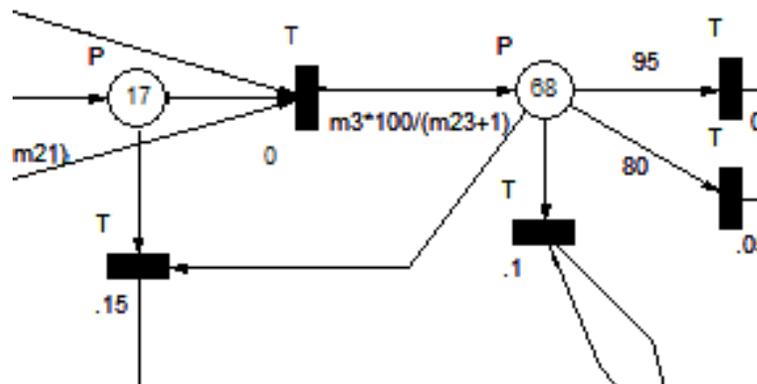


Figura 3.9. Comprobación de factor de potencia mediante red de Petri prueba de laboratorio dos.

Fuente: Autor

Así comprobando que el analizador y la red de Petri me da valores de cálculos casi parecidos, fallando en este caso por 1% valor del factor de potencia, cabe hacer énfasis en que este error es por las aproximaciones obtenidas en la red de Petri, ya que solo trabaja con enteros y los números con decimales son aproximados al inmediato superior o inferior según sea el caso.

En el siguiente caso sabemos debemos configurar a la red de Petri para que nos corrija un factor de potencia que en este caso sería 95%

Por lo tanto dentro de los caso de análisis y configuración de la corrección del factor de potencia debemos tener una corrección de $Q_c = 8.83 \text{ VAR}$ con un condensador o banco de capacitores conmutados de tal manera que el condensador total sea igual a 1.0 mF según cálculos de validación en matlab.

CALCULO DEL CAPACITOR PARA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA MONOFASICO

Ingrese frecuencia del sistema en Hz: 60

Ingrese el voltaje Rms del sistema: 15.3

Ingrese Potencia real del sistema del sistema por favor: 12.7

Ingrese Potencia reactiva del sistema por favor: 13

El factor de potencia es: 0.698805007598563

Especifique a cuanto quiere la nueva corrección del fp: .95

La potencia reactiva a corregir es: 8.825711864228438

El capacitor que se necesita es de: $1.000082354006823 \text{e-}04$

Conociendo que en el laboratorio de circuito eléctricos de la Universidad Politécnica Salesiana no existe condensadores de esta capacidad se aplica condensadores o bancos de condensadores similares pero con valores no tan exactos y obtenemos la siguiente corrección del factor de potencia.

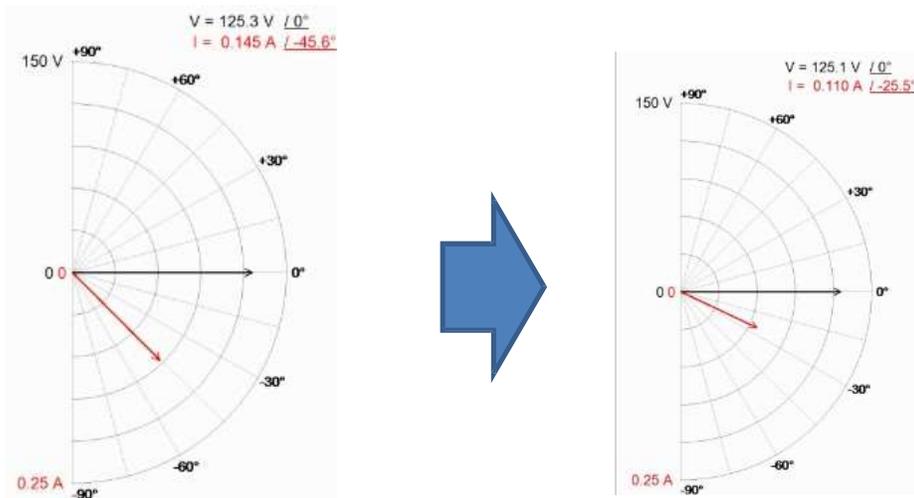


Figura 3.10. Comprobación corrección de factor de potencia laboratorio dos.

Fuente: Autor

Comprobando así la mejoría del factor de potencia no a su totalidad por motivos de instrumentos de laboratorio.

CAPÍTULO IV

GUÍA PARA REALIZAR LA PRÁCTICA DE LABORATORIO

Para un estudiante, las actividades en laboratorios le permiten la adquisición de destrezas prácticas, las cuales no son ejercitadas en las aulas. Por tal motivo la necesidad de profundizar en el conocimiento teórico mediante ejercicios prácticos en laboratorios se hace imprescindible en la enseñanza moderna de las universidades actuales.

En este capítulo se desarrolla un ejercicio de ejemplo para la realización de un laboratorio práctico de control del factor de potencia, utilizando nuestro controlador desarrollado con Perti Net en los capítulos anteriores. El controlador les permitirá apreciar de manera real el ajuste mediante bancos de capacitores o condensadores.

Esta actividad práctica de laboratorio consolidará los elementos teóricos recibidos durante el desarrollo en aulas, y desarrollará una motivación de investigación en los estudiantes, buscando el desarrollo de nuevas técnicas para controlar el factor de potencia en las redes eléctricas. También ejercitan la habilidad para el cálculo de los valores de capacidad que debe ser seleccionado automáticamente por el controlador en cada banco de condensadores, con el objetivo de generar potencia reactiva de compensación a partir de las variables de la instalación eléctrica..

4.1 Ejercicios para la realización de la práctica en la PC

Primera Práctica

La Figura 4.1. Muestra un esquema eléctrico a utilizar en la práctica de laboratorio, tanto con el método computacional como de la instalación real a realizar en el laboratorio, en el se observa la distribución de los diferentes componentes de control: el controlador, el compensador o actuador, el sensor, y el sistema.

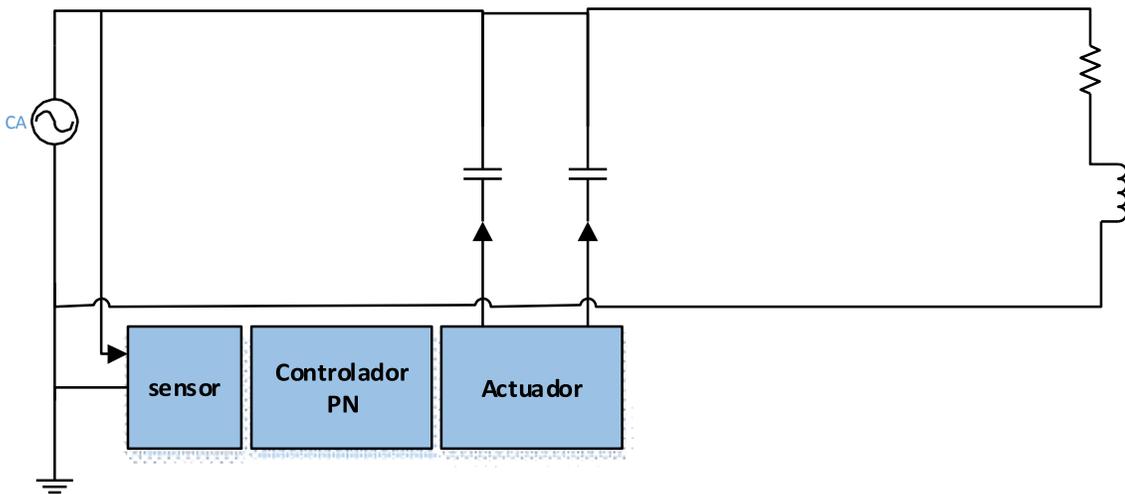


Figura 4.1. Esquema eléctrico para la realización de la práctica de laboratorio.

Fuente: Autor

Tareas a realizar:

Consideremos que una instalación eléctrica posee una carga que presenta la siguiente característica.

$$P = 1000W$$

$$Q = 480VAR$$

$$U = 120 V$$

$$F = 60 Hz$$

a) Diseñe un programa en Matlab que calcule el factor de potencia, nos indique cual es la potencia reactiva a corregir y el valor del condensador necesario total para obtener un factor de potencia fp de 0.95

▪ CALCULO DEL CAPACITOR PARA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA MONOFASICO

- Ingrese frecuencia del sistema en Hz: 60
- Ingrese el voltaje Rms del sistema: 120
- Ingrese Potencia real del sistema del sistema por favor: 1000W
- Ingrese Potencia reactiva del sistema por favor: 480VAR
- El factor de potencia es: 0.901523057468274
- Especifique a cuanto quiere la nueva corrección del fp: 0.95
- La potencia reactiva a corregir es: 1.513158948211368e+02
- El capacitor que se necesita es de: 2.787346369115422e-05

b) Utilizando dos bancos de condensadores de igual capacidad y se desea efectuar la corrección, proponga el algoritmo de conmutación del controlador para compensar el sistema.

Como dentro de cada uno de los de los bancos de condensadores tenemos condensadores de 2.5 uf, 5uf y 10uf podemos visualizar y analizar que con ninguna de las lograríamos llegará a una buena corrección puso que por el comportamiento de los condensadores la condición más alta a tener en capacitancia seria solo utilizar un banco de condensadores alcanzando así los 17uf

- c) Diseñe un diagrama eléctrico en el laboratorio, y coloque el controlador de PN, de manera que este actúe y compense el factor de potencia.



Figura 4.2. Circuito eléctrico para la realización de la práctica de laboratorio.

Fuente: Autor

- d) Proponga nuevos bancos de capacitores y un algoritmo de ajuste para el controlador de manera que es este ajuste me manera que este optimice el control y ajuste del factor de potencia automático.

Propongo se realice la implementación de bancos de condensadores más óptimos en el laboratorio que me permitan hacer la corrección de sistemas simulados con más potencia y que superen los 100W con cargas inductivas y reactivas pudiendo de esta manera utilizar el algoritmo de las ecuaciones (21) y (22) de una manera más adecuada.

Q_c

$$C = \overline{mV_{rms}^2}$$

$$C = \frac{P(\text{tag } \phi_r - \text{tag } \phi_n)}{2nf V_{rms}^2}$$

Haciendo uso de estas ecuaciones mediante grafos y controladores de Petri net como podemos visualizar en la figura 2.13. y que obedezca el a las siguientes instrucciones.

- Inicio
- Leer Carga
- Leer Voltaje y frecuencia (voltaje mayor que cero)
- Leer Potencia Activa y Reactiva
- Calcular Factor de Potencia
- Verificar $F_p \geq 0$ y $F_p \leq 100$
- Verifica Valor F_p
- Verificar intervalos de corrección
- Calculo de Corrección de potencia reactiva
- Conmutación de Condensadores
- Corrección del factor de potencia
- Verifica corrección del factor de potencia
- Fin

Segunda Práctica

La Figura 4.1. Muestra un esquema eléctrico a utilizar en la práctica de laboratorio, tanto con el método computacional como de la instalación real a realizar en el laboratorio, en el se observa la distribución de los diferentes componentes de control: el controlador, el compensador o actuador, el sensor, y el sistema.

Tareas a realizar:

Consideremos que una instalación eléctrica posee una carga que presenta la siguiente característica.

$$P = 1500W$$

$$\text{Cos } \theta = 0.75$$

$$U = 120 V$$

$$F = 60 \text{ Hz}$$

- e) Diseñe un programa en Matlab que nos indique cual es la potencia reactiva a partir de la potencia activa y Angulo de desfase, corregir los reactivos necesarios y el valor del condensador necesario total para obtener un factor de potencia fp de 0.95.

CALCULO DEL CAPACITOR PARA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA MONOFASICO

Ingrese frecuencia del sistema en Hz: 60

Ingrese el voltaje Rms del sistema: 120

Ingrese Potencia real del sistema del sistema por favor: 1500

Ingrese el factor de potencia por favor: .75

La potencia reactiva es: $1.322875655532296e+03$

Especifique a cuanto quiere la nueva corrección del fp: .95

La potencia reactiva a corregir es: $8.298494977640007e+02$

El capacitor que se necesita es de: $1.528641777679022e-04$

- f) Utilizando dos bancos de condensadores de igual capacidad y se desea efectuar la corrección, proponga el algoritmo de conmutación del controlador para compensar el sistema.



Figura 4.3. Esquema eléctrico para la realización de la práctica de laboratorio.

Fuente: Autor

- g) Diseñe un diagrama eléctrico en el laboratorio, y coloque el controlador de PN, de manera que este actúe y compense el factor de potencia.

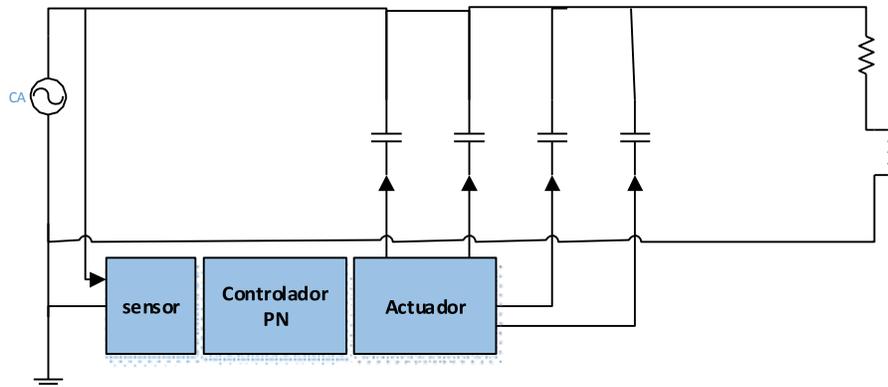


Figura 4.4. Esquema eléctrico para la realización de la práctica de laboratorio.

Fuente: Autor

Con este circuito propongo a conmutación se haga con cuatro condensadores individuales que tengan la capacitancia para corregir el factor de potencia de sistemas eléctricos reales.

- h) Proponga nuevos bancos de capacitores y un algoritmo de ajuste para el controlador de manera que es este ajuste me manera que este optimice el control y ajuste del factor de potencia.

Propongo se realice la implementación de bancos de condensadores más óptimos en el laboratorio que me permitan hacer la corrección de sistemas simulados con más potencia y que superen los 100W con cargas inductivas y reactivas pudiendo de esta manera utilizar el algoritmo de las ecuaciones (21) y (22) de una manera más adecuada.

$$C = \frac{Q_c}{mV_{rms}^2}$$

$$C = \frac{P(\text{tag } \phi_r - \text{tag } \phi_n)}{2nf V_{rms}^2}$$

Haciendo uso de estas ecuaciones mediante grafos y controladores de Petri net como podemos visualizar en la figura 2.13.

CONCLUSIONES

- Existen diversos medios para el mejorar (elevar) el factor de potencia, pero con el uso de capacitores se logran los mayores beneficios técnico-económicos por las ventajas que este ofrece, tanto en media como baja tensión aparte de la a manera instantánea en la que corrigen el ángulo de desfase existente entre voltaje y corriente.
- El diseño en PN fue creado y simulado en el programa VisObjNet y verificado en el toolbox de Matlab, donde se puede apreciar de una manera fácil y sencilla los esquemas de simulación y control en PN de todo el proceso, si como el funcionamiento del controlador de PN facilitando su análisis y aprendizaje.
- Con el desarrollo de nuestra tesis, se crea la posibilidad de utilizar el controlador de PN para la corrección del factor de potencia como una herramienta virtual, que permita el desarrollo de manera práctica de la teoría estudiada en la clase, y desarrollar el conocimiento y la identificación del comportamiento de los sistemas a utilizar en el diagnóstico, control y corrección del FP.
- Con el adecuado seguimiento e investigación a partir de esta tesis se podría diseñar de manera física el controlador para operar en los ambientes industriales y comerciales de distintos segmentos del mercado.
- Los principales tipos de cargas en los sistema eléctricos son del tipo inductivo y a la misma vez en la mayoría de los casos siempre la corrección del factor de potencia se lo hace de manera capacitiva mas no inductiva, es decir la señal de corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje.

RECOMENDACIONES

- La continuación del proyecto hasta implementar de manera física y electrónica el controlador diseñado en nuestra tesis que permita verificar ya no de manera virtual sino de manera real el comportamiento del control basado en Petri Net.
- Aumentar el stock de libros para investigación en biblioteca para el estudio de control inteligente, no solo sobre la teoría de grafos de Petri Net sino también sobre control fuzzy, redes neuronales, algoritmos genéticos y entre otros que permitan la implementación de controladores inteligentes híbridos o combinados basado en técnicas de inteligencia artificial.
- La adquisición de materiales más adecuados dirigidos a las prácticas de corrección del factor de potencia para que el aprendizaje se ajuste más a la realidad de los sistemas eléctricos existentes.
- El análisis de redes de Petri aplicados a sistemas o controladores automáticos debería ser implementado en la carrera a manera de seminario para con estos conocimientos obtener una mejor comprensión y análisis de las pruebas propuestas en laboratorio para la corrección del factor de potencia.
- Considerar que las redes de Petri no solo se puede implementar en el laboratorio de circuitos eléctricos sino más bien a futuro deberían ser consideradas para las materias de automatización que se encuentren dentro de la malla académica.

REFERENCIAS

- [1] R. C. DORF and http://www.alfaomega.com.mx/af/images/libros/5383_1?1316728119, *Circuitos Electricos*, Octava edicion edition. México: Alfaomega Grupo Editor, 2011.
- [2] D. A. G. C. Hernández, *Electricidad Básica - Corriente Alterna*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, p. 246.
- [3] P. C. Rodriguez, *Componentes Electronicos*. Componentes Electronicos, 2013, p. 64.
- [4] V. M. RIVERA, *La Historia de los Capacitores Electronicos, Diferencias y sus Utilidades*. p. 25.
- [5] E. S. Lincoln, *Equipos de Proteccion Electrica y Correccion del Factor de Potencia*, First Edit. Buenos Aires : Ediciones Libreria del Colegio, 1950.
- [6] E. of CPI, *La Guia Completa sobre Instalaciones Electricas: -Edicion Conforme a las normas NEC 2008-2011 -Actualice su Panel Principal de Servicio -Descubra los*, Spanish Language Edition, CPI-owned Spanish translation of CG to Wiring edition. Creative Publishing international, 2009, p. 352.
- [7] M. A. Sobrevila and A. L. Farina, *Instalaciones Electricas*. Barcelona: Instalaciones Electricas, 2014, p. 530.
- [8] V. Lladonosa, *Instalaciones Eléctricas de Interior*. Marcombo, S.A., 2010, p. 188.
- [9] R. Lapuh, P. Clarkson, U. Pogliano, J. K. Hallstrom, and P. S. Wright, "Comparison of Asynchronous Sampling Correction Algorithms for Frequency Estimation of Signals of Poor Power Quality," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 7, pp. 2235–2241, Jul. 2011.
- [10] J. A. H. Montaña, *Un nuevo esquema de sistema de alimentación ininterrumpible en CA: Con corrección del factor de potencia, cargador/ descargador de batería aislado, e inversor de alta eficiencia*. Editorial Académica Española, 2012, p. 120.
- [11] A. Mariscotti, "Measuring the power quality of railway networks," 2010, pp. 686–690.
- [12] R. Barreto, *Control de la Potencia Reactiva: para una mas eficiente distribucion de energia electrica*. Sudbury, Mass.: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, p. 38.
- [13] J. Balcells, *Autómatas programables*. Barcelona: Marcombo, S.A., 2009, p. 460.
- [14] J. P. Fernandez, *Pruebas de electrotécnia de acceso a la universidad*. Madrid: Cultiva Comunicacion SL, 2009, p. 84.
- [15] *FQPF13N50C N-Channel MOSFET Cambio rápido de 13 A a 500 V*. .
- [16] K. Page, *Entec Directory Of Environmental Technology European Edition*, 1 edition. Boca Raton: CRC Press, 1993, p. 1033.

- [17] S. Umesh, L. Venkatesha, and A. Usha, "Active power factor correction technique for single phase full bridge rectifier," 2014, pp. 130–135.
- [18] D. Beams and S. Boppana, "Modeling and simulation of off-line boost power factor correction (PFC) circuits," 2010, pp. 177–181.
- [19] Y.-M. Chen, Y.-C. Liu, and F.-Y. Wu, "Multiinput converter with power factor correction, maximum power point tracking, and ripple-free input currents," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 3, pp. 631–639, May 2004.
- [20] U. Celtekligil, "Capacitive power factor and power quality correction of a light rail transportation system," 2008, vol. 2, pp. 415–418.
- [21] W. Reisig, *Understanding Petri Nets: Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies*, 2013 editi. Berlin: Springer, 2013, p. 230.
- [22] B. Hruz and M. Zhou, *Modeling and Control of Discrete-event Dynamic Systems: with Petri Nets and Other Tools*, 2007 edition. London: Springer, 2007, p. 342.
- [23] P. J. Haas, *Stochastic Petri Nets: Modelling, Stability, Simulation*, 2002 edition. New York: Springer, 2002, p. 510.
- [24] R. Hinrichs, Ed., *Petri Nets and Manufacturing Systems*. CLANRYE INTERNATIONAL, 2015, p. 204.
- [25] D. Nakamura, Y. Takeda, H. Murakoshi, N. Funakubo, and Y. Dohi, "A modeling language for Petri net based factory automation systems," 1998, vol. 1, pp. 120–125 vol.1.
- [26] R. David and H. Alla, "Petri nets for modeling of dynamic systems: A survey," *Automatica*, vol. 30, no. 2, pp. 175–202, Feb. 1994.
- [27] L. Popova-Zeugmann, *Time and Petri Nets*, 2013 edition. Springer, 2013, p. 209.
- [28] X. Tong, X. Wang, and K. M. Hopkinson, "The Modeling and Verification of Peer-to-Peer Negotiating Multiagent Colored Petri Nets for Wide-Area Backup Protection," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 1, pp. 61–72, Jan. 2009.
- [29] M. Iordache and P. J. Antsaklis, *Supervisory Control of Concurrent Systems: A Petri Net Structural Approach*, 2006 edition. Berlin, Heidelberg: Birkhäuser, 2006, p. 286.
- [30] C. F. Silva, C. Quintáns, A. Colmenar, M. A. Castro, and E. Mandado, "A Method Based on Petri Nets and a Matrix Model to Implement Reconfigurable Logic Controllers," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3544–3556, Oct. 2010.
- [31] W. M. P. van van der Aalst and C. Stahl, *Modeling Business Processes: A Petri Net-Oriented Approach*. Cambridge, Mass: The MIT Press, 2011, p. 400.
- [32] R. Lukaszewski and W. Winiecki, "Petri Nets in Measuring Systems Design," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 5, pp. 952–962, May 2008.

- [33] S. Attaway, *Matlab, Second Edition: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving*, 2 edition. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2011, p. 544.
- [34] CL-Engineering and S. J. Chapman, *MATLAB Programming with Applications for Engineers*, 1 edition. Stamford, CT: CL-Engineering, 2012, p. 592.
- [35] K. Jensen and L. M. Kristensen, *Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems*, 2009 edition. Dordrecht ; New York: Springer, 2009, p. 384.
- [36] C. Girault and R. Valk, *Petri Nets for Systems Engineering: A Guide to Modeling, Verification, and Applications*, Softcover reprint of hardcover 1st ed. 2003 edition. Heidelberg: Springer, 2010, p. 607.
- [37] W. Reisig and G. Rozenberg, Eds., *Lectures on Petri Nets I: Basic Models: Advances in Petri Nets*, 1998 edition. Berlin ; New York: Springer, 1998, p. 477.
- [38] T. Nishi and R. Maeno, "Petri Net Decomposition Approach to Optimization of Route Planning Problems for AGV Systems," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 523– 537, Jul. 2010.
- [39] W. Wu, F. Wen, Y. Xue, and X. Yin, "Power system fault diagnosis with a weighted fuzzy time Petri net," 2012, pp. 1–7.
- [40] W. G. K. Ihlenfeld, "A simple, reliable, and highly stable AC voltage amplifier for calibration purposes," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, no. 5, pp. 1964–1967, Oct. 2005.