

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UN
COMPENSADOR ESTÁTICO CON CONTROL
DIFUSO PARA MEJORAR EL FACTOR DE
POTENCIA”**

AUTOR: RUSSELL CÓRDOVA RUIZ

(PERIODO DE EJECUCIÓN: Del 01 de abril del 2023 al 31 de marzo del 2024)

(Resolución de aprobación N°278-2023-R.)

Callao, 2024

Prudh

HOJA DE REFERENCIA DE APROBACIÓN

DEDICATORIA

A mis padres, In memoriam, por su constante presencia espiritual quienes, por su temprana partida, nunca pudieron ver mi objetivo alcanzado.



AGRADECIMIENTO

A Dios por mantener a mi familia y amistades con vida.

 v

INDICE

HOJA DE REFERENCIA DE APROBACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
INDICE	1
TABLAS DE CONTENIDOS	3
INDICE DE FIGURAS.....	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.1. Descripción de la realidad problemática	8
1.2. Formulación del problema (Problema general y específico).....	8
1.3. Objetivos (general y específicos)	8
1.4. Limitantes de la investigación (Teórico, temporal, espacial)	9
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1. Antecedentes (internacional y nacional)	10
2.2. Marco:.....	10
2.2.1 Teórico.....	10
2.2.2 Conceptual	12
2.3. Definición de términos básicos.....	21
CAPITULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES	23
3.1. Hipótesis	23
3.2. Definición conceptual de variables.....	23
3.3. Operacionalización de variables.....	23
CAPITULO IV: DISEÑO METODOLOGICO.....	25
4.1. Tipo y diseño de investigación	25
4.2. Método de investigación.....	25



4.3. Población y muestra	25
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado	26
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	26
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	26
CAPITULO V: RESULTADOS	27
5.1. Resultados descriptivos.....	27
5.2. Resultados inferenciales	28
CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	29
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	29
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.	29
6.3. Responsabilidad ética	29
CONCLUSIONES	30
RECOMENDACIONES	31
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
ANEXOS	33
Matriz de consistencia	34



TABLAS DE CONTENIDOS

Tabla 1 Reglas Difusas.....	20
Tabla 2 Operacionalización de variables.....	24



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de control con lógica difusa.....	13
Figura 2 Configuración básica de un control difuso	13
Figura 3 Modelo del sistema Red Eléctrica	14
Figura 4 Unifilar de un Statcom	15
Figura 5 Circuito de Control.....	16
Figura 6 Estructura de los controladores.....	17
Figura 7 Partición difusa del error “control Vdc”	18
Figura 8 Partición difusa del error “control Q”	18
Figura 9 Partición difusa derivada del error “control Vdc”	18
Figura 10 Partición difusa derivada del error “control Q”	19
Figura 11 Partición difusa de la salida “control Vdc”	19
Figura 12 Partición difusa de la salida “control Q”	20
Figura 13 Diagrama General de la Red Eléctrica.....	21
Figura 14 Potencia P-Q fuente sin Statcom	27
Figura 15 Potencia P-Q fuente con Statcom	28
Figura 16 Factor de potencia fuente sin Statcom.....	28
Figura 17 Factor de Potencia fuente con Statcom	28



RESUMEN

Este trabajo de investigación trata sobre el Modelamiento y simulación de un compensador estático con control difuso para mejorar el factor de potencia, en una red eléctrica de media tensión para la regulación del factor de potencia (FP), La metodología empleada en la investigación está conformada por el modelado del proceso, estrategia de control mediante transformación de Park y modulación de ancho de pulso senoidal, por último el diseño del control difuso. Se puede verificar que los controladores mantienen el factor de potencia (FP) dentro de la unidad o valor deseado.

Este tipo de control avanzado (lógica difusa), tiene la capacidad de manejar data impredecible, haciéndolo útil en procesos complejos, que son muy difícil de realizarlo por métodos clásicos.

Palabras claves: Control difuso, factor de potencia, compensador Sincrono (Statcom).



ABSTRACT

This research work deals with the Modeling and simulation of a static compensator with fuzzy control to improve the power factor, in a medium voltage electrical network for the regulation of the power factor (PF). The methodology used in the research is made up of by modeling the process, control strategy using Park transformation and sinusoidal pulse width modulation, and finally the design of fuzzy control.

It can be verified that the controllers maintain the power factor (PF) within the desired unit or value.

This type of advanced control (fuzzy logic) has the ability to handle unpredictable data, making it useful in complex processes that are very difficult to carry out using classical methods.

Key words: Fuzzy control, power factor, Synchronous compensator (Statcom).



INTRODUCCIÓN

En la distribución de energía eléctrica es cada vez más común la presencia de cargas no lineales que introducen restricciones de estabilidad y limitan la cantidad de potencia activa transferida en una línea, haciéndose necesario la compensación de potencia reactiva.

En una red eléctrica surgen perturbaciones que afectan la eficiencia del servicio eléctrico y se requieren la implementación de acciones para su control y estabilidad.

Una de estas perturbaciones se relaciona con el aumento de cargas reactivas y su incidencia directa sobre el Factor de Potencia (FP), ocasionando caída de tensión o baja regulación de voltaje, el aumento de la intensidad de corriente en los conductores eléctricos y transformadores, así como también el incremento de potencia, disminución de la transferencia de potencia activa e inestabilidad de los sistemas.

El presente trabajo de investigación es de aplicación de la electrónica de potencia, es decir la aplicación de dispositivos semiconductores de conmutación.

Este trabajo de investigación, está también relacionado con el control difuso de reactivos, inyectando o absorbiendo energía utilizando electrónica de potencia (Statcom) y regular de esta manera el Factor de Potencia. Se muestra la configuración del control, la red eléctrica, el compensador y los resultados que se obtuvieron, en la simulación con Matlab/Simulink



CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La masificación del consumo de energía eléctrica y el desarrollo acelerado de la tecnología en equipos eléctricos y electrónicos, en nuestros días, han dado origen a perturbaciones eléctricas, que afectan la eficiencia del suministro eléctrico, dando como resultado el funcionamiento erróneo de los equipos y procesos ocasionando pérdidas económicas en el sistema eléctrico, la variación de voltaje, estabilidad (estado estable y dinámico), frecuencia, el factor de potencia (FP), deteriorando así, la calidad de energía del suministro eléctrico.

Hoy en día con el avance de la electrónica de potencia ha sido posible tener dispositivos de control de voltaje con mejores características que los empleados anteriormente, este el caso del STATCOM, que es un equipo de compensación síncrono.

1.2. Formulación del problema (Problema general y específico)

- **Problema general**

¿Cómo el compensador estático con control difuso mejora el factor de potencia?

- **Problemas específicos**

¿Cómo el modelamiento del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia?

¿Cómo la simulación del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia?

1.3. Objetivos (general y específicos)

- **Objetivo general**

Modelamiento y simulación de un compensador estático, con control difuso.



- **Objetivos específicos**
- Modelamiento de un compensador estático, con control difuso mediante Matlab/simulink.
- Simulación de un compensador estático con control difuso mediante Matlab/simulink.

1.4. Limitantes de la investigación (Teórico, temporal, espacial)

- **Teórica**

La investigación está limitada a un modelamiento y simulación de un compensador estático con control difuso para mejorar el factor de potencia.

- **Temporal**

El tiempo establecido para realizar la investigación, es de 12 meses.

- **Espacial**

El espacio de trabajo, es el ambiente donde se encuentra mi biblioteca de consulta, el computador y la respectiva impresora.



CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes (internacional y nacional)

- **Internacional**

C. Raúl Delfino Sotelo León (2012), adscrito al departamento de Ingeniería Eléctrica, autoriza al Instituto Politécnico Nacional de la Ciudad de México, mencionando expresamente a su autor intelectual, para su difusión con fines académicos y de investigación el trabajo titulado: "Control Difuso para la Estabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia"

En este trabajo de investigación, desarrolla un sistema de control con el uso de las técnicas de la inteligencia artificial, específicamente la lógica difusa para la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia, hace un estudio detallado, confiable y satisfactorio del comportamiento de este tipo de técnicas.

- **Nacional**

Deybis Aponte, Primo (2005), En la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, el propósito de este informe es explicar cómo la nueva tecnología de compensador de potencia reactiva puede mejorar el funcionamiento del sistema eléctrico (SEP). En este trabajo se han propuesto nuevas y mejores herramientas para solucionarlo. Por otro lado, hace mención que una vez que tenga una nueva herramienta, se debe de utilizarla para volver a examinar el problema y encontrar una solución mejor y más económica (este es el caso de STATCOM, que es la solución a muchos de los problemas que encontramos actualmente).

2.2. Marco:

2.2.1 Teórico

Control Difuso

La teoría del control convencional usa un modelo matemático explícito (analítico) de un proceso a ser controlado y las especificaciones deseadas del comportamiento para el diseño del controlador. Este enfoque puede ser inferior si el modelo del proceso es difícil de obtener, parcialmente desconocido, o altamente no lineal. El diseño de controles para las tareas



cotidianas aparentemente fáciles, tales como conducir un coche o agarrar un objeto frágil sigue siendo un reto para la robótica, mientras que estas tareas son llevadas a cabo por los seres humanos. Sin embargo, en los seres humanos no se utilizan modelos matemáticos ni trayectorias exactas para controlar tales procesos [13].

Muchos procesos controlados por operadores humanos en la industria no pueden ser automatizados utilizando técnicas convencionales de control, ya que el rendimiento de estos controladores es a menudo inferior a la de los operadores. Una de las razones es que los controles lineales que son comúnmente utilizados en el control convencional, no son apropiados para las plantas no lineales. Otra razón es que los seres humanos agregan diferentes tipos de información y combinan las estrategias de control, no pueden integrarse en una ley de control de análisis individual. El principio subyacente del control basado en el conocimiento de un experto es capturar y poner en práctica la experiencia y los conocimientos disponibles (por ejemplo, los operadores de proceso). Un tipo específico de control basado en el conocimiento es el control difuso basado en reglas, donde las acciones de control correspondientes a las condiciones particulares del sistema se describen en términos difusos de reglas si-entonces (if-then en inglés). Los conjuntos difusos se utilizan para definir el significado de los valores cualitativos de las entradas y salidas del controlador tal como error pequeño, la acción de control grande. La lógica difusa puede capturar la naturaleza continua de los procesos de decisión humanos y como tal es una mejora definitiva sobre los métodos basados en la lógica binaria que son ampliamente utilizados en controladores industriales [13].

Los primeros trabajos en el control difuso fueron motivados por el deseo de:

- Imitar las acciones de control de un operador humano con experiencia (parte basada en el conocimiento).
- Obtener la interpolación suave entre salidas discretas que normalmente se obtienen (lógica difusa).

Desde entonces, el rango de aplicación del control difuso se ha ampliado considerablemente. La naturaleza lingüística del control difuso permite



expresar el conocimiento del proceso con respecto a cómo el proceso debe ser controlado o cómo se comporta el proceso. El aspecto de interpolación del control difuso ha llevado al punto de vista donde los sistemas difusos (SDs) son vistos como esquemas fluidos de una función de aproximación.

En la mayoría de los casos un controlador difuso se utiliza para el control de realimentación directa. Sin embargo, también se puede utilizar en el nivel de supervisión como, por ejemplo, un dispositivo de auto-ajuste en un control convencional PID (proporcional-integral-diferencial). También, el control difuso ya no sólo se utiliza para expresar directamente un proceso de conocimiento a priori. Por ejemplo, un controlador difuso se puede derivar de un modelo difuso obtenido a través de identificación del sistema. Los más frecuentemente utilizados son [13]:

El Control tipo Mamdani, ya sea con los consecuentes difusos o de semifalla. Este tipo de control se utiliza generalmente como consecuencia directa de circuito-cerrado del controlador.

El Control Takagi-Sugeno, por lo general utilizado como un control de supervisión.

La principal diferencia entre estos controles radica en la consecuencia de las reglas.

Para el control de tipo Mamdani esta consecuencia es un conjunto difuso y para el tipo Takagi-Sugeno es una función lineal de las entradas [14].

2.2.2 Conceptual

Estructura de un control difuso

La estructura básica de un sistema de control con lógica difusa (FLC), se muestra en la figura N° 1 [24].



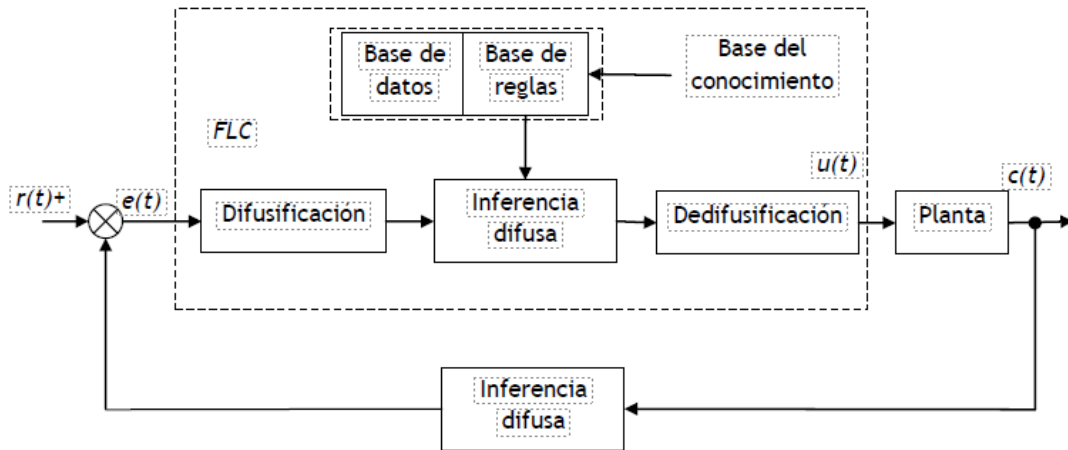


Figura 1 Sistema de control con lógica difusa

Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

La lógica difusa, por su parte proporciona un medio para enfrentar situaciones del mundo real, complejas y dinámicas, que son planteadas más fácilmente mediante palabras del lenguaje común que por modelos matemáticos y como se muestra con este artículo, posee una gran aplicabilidad en este tipo de sistemas no lineales.

En esencia un controlador difuso contiene un algoritmo capaz de convertir una estrategia de control lingüística en una de control automático, con lo que se busca imitar el razonamiento humano.

El algoritmo de control se da como un conjunto de expresiones del tipo:

Si <Condiciones> Entonces <Acciones>

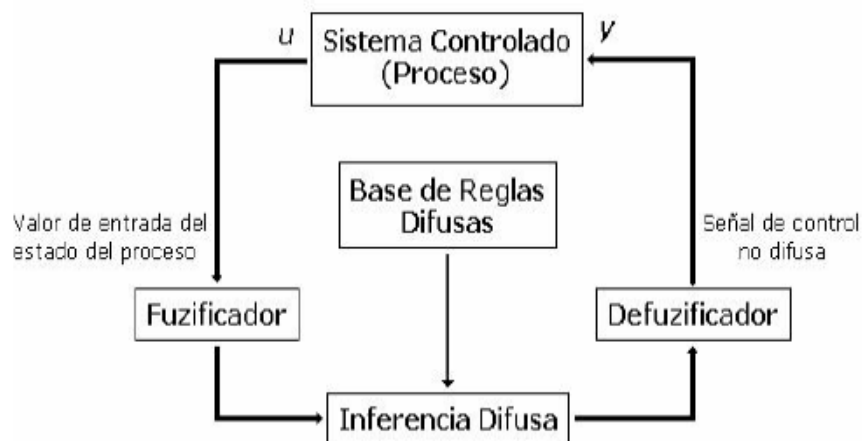


Figura 2 Configuración básica de un control difuso

Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

- Modelar el compensador estático y simular su respuesta en lazo abierto
El modelado del proceso se realizó mediante la implementación de modelos de SimPowerSystem, al combinar los bloques de generación, junto con los elementos de carga, transformación e impedancia y configurando los parámetros de cada uno de ellos, según especificaciones de la red, se obtiene el modelo en estudio que se muestra en la figura 3.

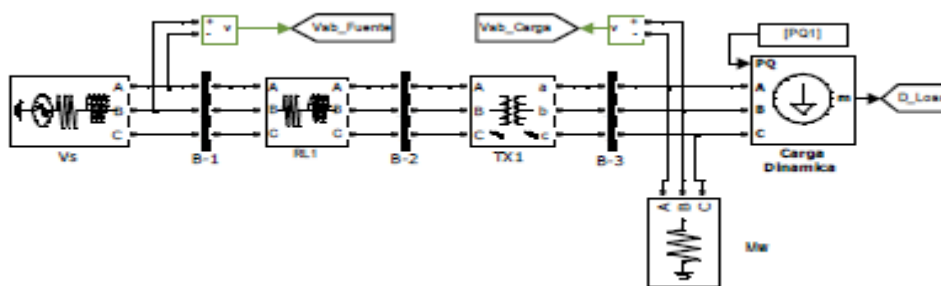


Figura 3 Modelo del sistema Red Eléctrica
Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

- Diseño del controlador difuso
El diseño del controlador está sujeto a la estrategia de control a implementar para inyectar o absorber reactivos de la red, en este caso se utilizó un Statcom, este dispositivo está conformado por un inversor fuente de voltaje, que intercambia flujo de potencia con la red, a través de un transformador de reactancia, y así de esta manera ampliar los límites de estabilidad del sistema y a la vez mejorar algunos de los parámetros de operación.
La compensación de potencia reactiva y el soporte en la regulación de tensión son asuntos muy importantes dentro de la operación y control de los sistemas eléctricos de potencia.
Los STATCOM son dispositivos altamente no lineales, al igual que el resto del sistema al cual están conectados. Los esquemas de control no lineal tienen una estructura más sofisticada y son más difíciles de diseñar e implementar comparados con los sistemas de control del tipo lineal.
La lógica difusa, por su parte proporciona un medio para enfrentar situaciones del mundo real, complejas y dinámicas, que son planteadas más fácilmente

mediante palabras del lenguaje común, que por modelos matemáticos y como se muestra en este trabajo de investigación, posee una gran aplicabilidad en este tipo de sistemas no lineales.

- Modelar el compensador estático y simular su respuesta en lazo abierto Este compensador se puede modelar, como una fuente de voltaje regulada V_s conectada a una barra de voltaje V_o , a través de un transformador [4], como puede verse en la figura 4.

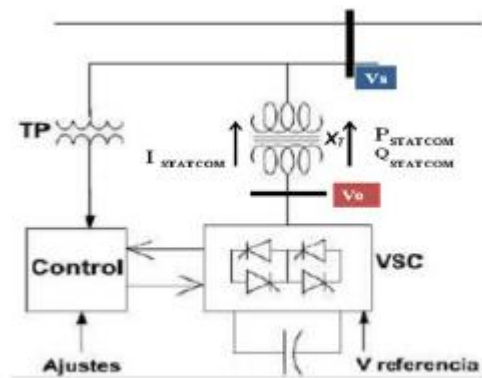


Figura 4 Unifilar de un Statcom

Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

Al usar las ecuaciones clásicas que describen el flujo de potencia activa y reactiva [2], en una línea corta en términos de los valores V_o y V_s , la impedancia del transformador X_T , en nuestro caso asumimos ideal, la diferencia angular entre ambas barras (δ), podemos definir $P_{statcom}$ y $Q_{statcom}$.

$$P_{STATCOM} = \frac{|V_o||V_s|}{X_T} \cdot \sin(\delta)$$

$$Q_{STATCOM} = \frac{|V_o||V_s|}{X_T} \cdot \cos(\delta) - \frac{|V_s|^2}{X_T}$$

Donde δ es el ángulo de V_s respecto de V_o , en este sistema, cuando el Statcom opera a $\delta = 0$, la potencia activa enviada del dispositivo al sistema se hace cero, mientras que la potencia reactiva dependerá del módulo de las tensiones.

Esta condición implica que la corriente que circula por el transformador (IStatcom) deberá tener $\pm 90^\circ$ de desfase respecto al fasor V_s . Así si $|V_s|$ es mayor a $|V_o|$, los reactivos serán enviados del Statcom al sistema (operación capacitiva), dando lugar una circulación de corriente en ese sentido, caso contrario, los reactivos serán absorbidos del sistema por el Statcom (operación inductiva) y la corriente circulará en sentido opuesto.

- Diseño del controlador difuso

La estrategia de control para el inversor, es un circuito que usa dos controladores difusos, uno controla la energía reactiva Q y el otro el voltaje V_{dc} de los condensadores. El circuito utiliza la transformación de Park para descomponer los fasores trifásicos de tensión y de corriente de la Red Eléctrica en dos componentes desacopladas entre sí, llamadas componente de eje directo d y componente de eje de cuadratura q .

Así se transforma la corriente de la red del sistema de referencia abc en valores continuos o sistema de referencia síncrono $d-q$, al estar desacopladas las componentes d y q , resulta apropiado el controlar el eje directo para la regulación del voltaje en los condensadores. [1]

El esquema de control se muestra en la figura 5.

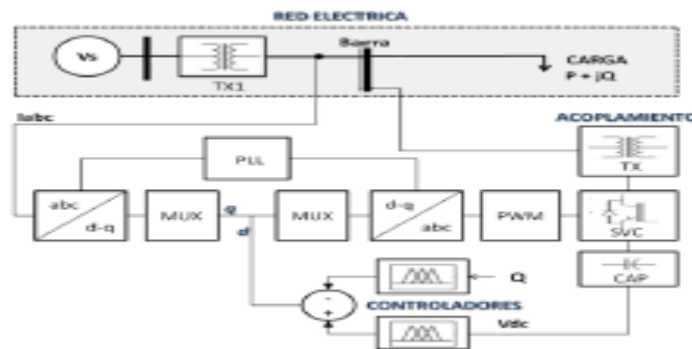


Figura 5 Circuito de Control

Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

Control Difuso

El controlador difuso debe tener el algoritmo capaz de convertir la estrategia de control lingüística en una de control automático.

La configuración de los controladores está basada en la metodología de MAMDANI, con el método de los mínimos defusificación tipo centroide según establece [3], [5].

La estructura de los controladores está conformada por dos entradas una salida, como se puede apreciar en la siguiente figura 6.

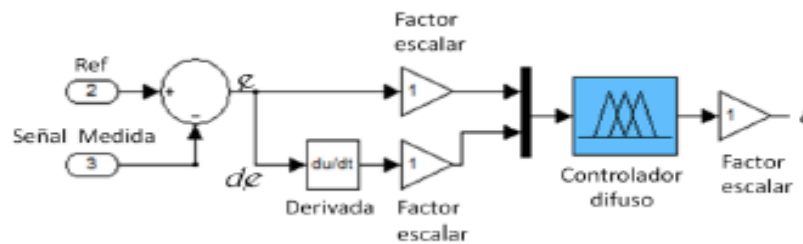


Figura 6 Estructura de los controladores

Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

Los controladores difusos utilizan dos entradas de datos, la primera entrada es el error “e”, que se calcula como la diferencia entre el valor medido y el valor deseado. Esta entrada cuantifica que tan lejos o cerca está el valor actual de la referencia.

La segunda entrada es la derivada del error “de”, se calcula como la diferencia entre el valor actual y el valor medido en la iteración anterior. Esta entrada cuantifica que tan rápido o lenta cambia la variable.

Las salidas de los controladores se restan para regular la corriente del eje directo, de tal manera que cuando se produzca una variación entre la tensión de referencia de los condensadores y la energía reactiva de la fuente, la corriente del eje directo “id” cambia generando una variación en la magnitud de la tensión de los condensadores.

Partición difusa de los Controladores

Por lo general se escogen universos de discurso estandarizados, así que se toma para las entradas “e”, “de” y salida δ [-1 1]. Luego se aplica factores de escala para cada variable según el proceso. Para ambas variables de entrada, error (e) y derivada del error (de), se particionó el universo de discurso de las variables de entrada en tres conjuntos borrosos (para los dos controladores), definidos con funciones de pertenencia trapezoidales y triangulares.

A cada conjunto borrosos se le asoció una etiqueta lingüística. Las siguientes figuras muestran la partición difusa del error (e) y derivada del error (de) para los dos controladores.

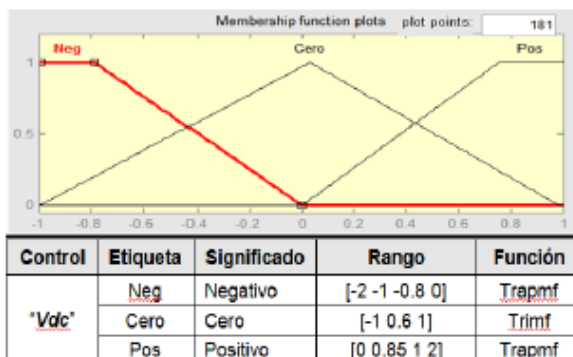


Figura 7 Partición difusa del error "control Vdc"
Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

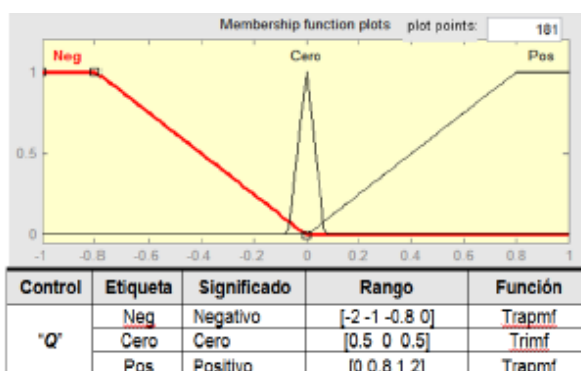


Figura 8 Partición difusa del error "control Q"
Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

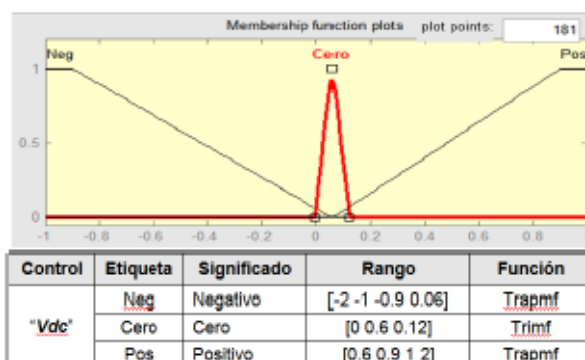


Figura 9 Partición difusa derivada del error "control Vdc"
Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

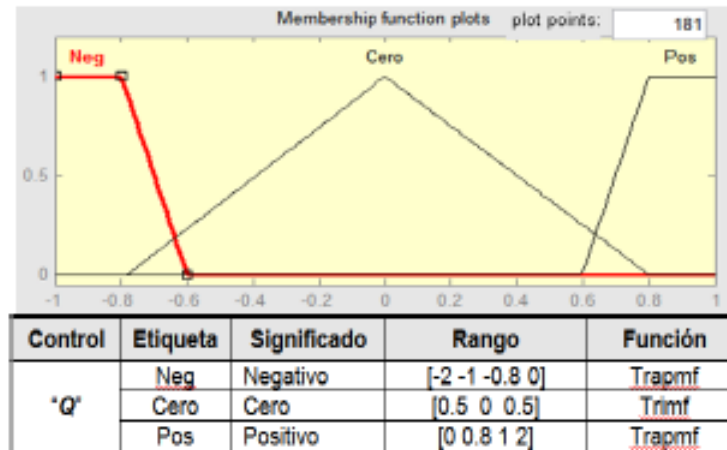


Figura 10 Partición difusa derivada del error "control Q"
Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

Partición difusa de las salidas

En la variable de salida δ , se particionó el universo de discurso en tres conjuntos borrosos para ambos controladores, definidos con funciones de pertenencia gaussianas, trapezoidales y triangulares.

Las siguientes figuras muestran las respectivas configuraciones.



Figura 11 Partición difusa de la salida "control Vdc"
Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

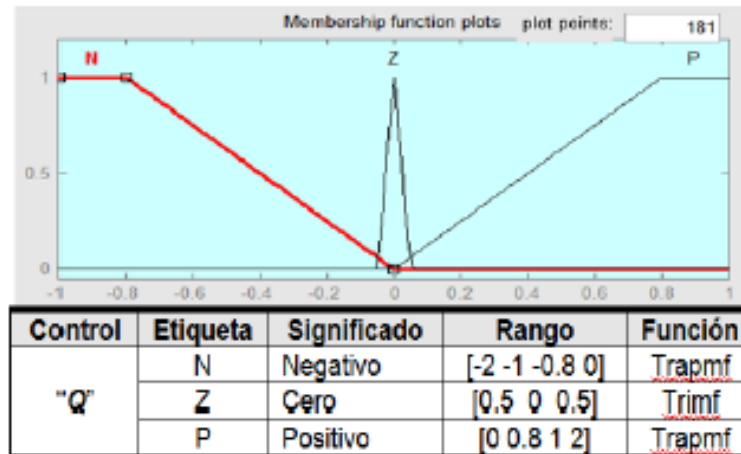


Figura 12 Partición difusa de la salida "control Q"

Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

Base de Reglas difusas

Las reglas de control se basaron en la forma de una declaración IF-AND-THEN. Los antecedentes de las reglas corresponden directamente al grado de membresía calculada durante el proceso de fusificación. La base de reglas quedo configurada para ambos controladores como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Reglas Difusas

		Error "e"		
		Neg	Cero	Pos
Derv. Error "de"	Neg	P	Z	N
	Cero	P	Z	N
	Pos	P	Z	N

Configuración General del Sistema

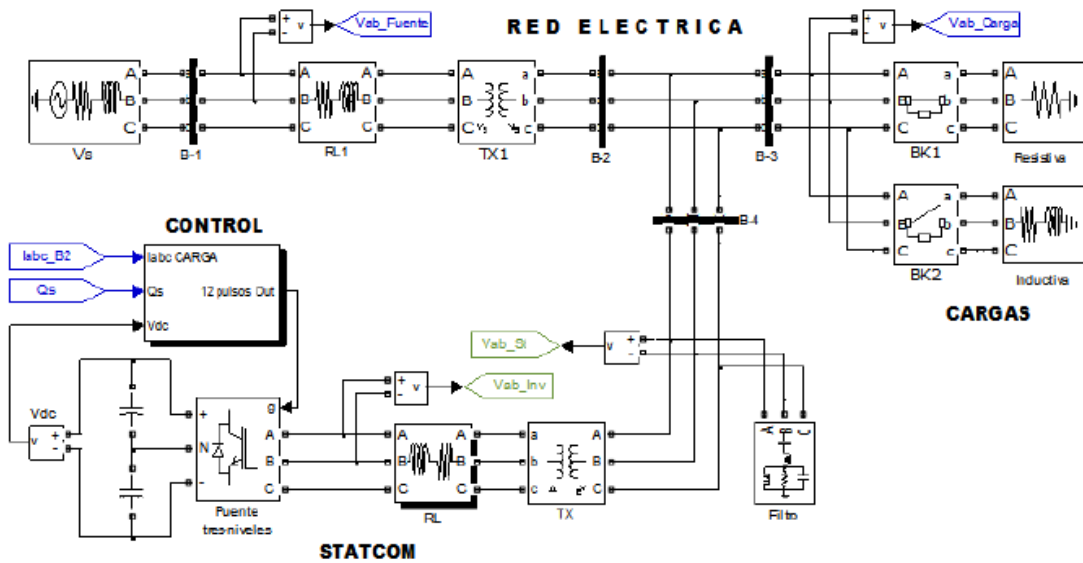


Figura 13 Diagrama General de la Red Eléctrica
Fuente: Autoría propia (UNAC-2023)

La Fig.13 muestra la red en estudio, está conformada por una fuente de 138 KV, una impedancia $RL = 2\text{m}\Omega$, un transformador 138KV/24KV, una carga lineal de 23 Mw y una carga RL de 15Mw/22MVA. El compensador está realizado con IGBT's y condensadores de 5mf, la rama de acoplamiento está conformada por un filtro RL ($R = 95\text{m}\Omega$, $L = 1,15\text{mh}$). El transformador de acoplamiento tiene una relación de 24KV/4,8KV, de esta manera se representa las pérdidas del conductor y se atenúa el contenido armónico del inversor.

2.3. Definición de términos básicos

Convertidor de Potencia. - La conversión de potencia es el proceso de convertir la energía de una forma a otra.

Circuito de Potencia. - Es la electrónica de los elementos de estado sólido y equipos para el manejo de la potencia eléctrica, aquí se prioriza la conversión de energía con el máximo rendimiento y la disminución de pérdidas en forma de calor.

Circuito de control. - Es la electrónica digital que, mediante un microcontrolador, microprocesador u otro, prioriza la generación de señales de control necesarias para el correcto funcionamiento del proceso, pasando a segundo plano el rendimiento del sistema de control.

Circuitos de Conmutación. - En electricidad y electrónica, las leyes del álgebra de Boole y de la lógica binaria, pueden estudiarse mediante circuitos de conmutación. Un circuito de conmutación estará compuesto por una serie de contactos que representarán las variables lógicas de entrada y una o varias cargas que representarán las variables lógicas o funciones de salida.

Estrategias. - Son acciones propias del investigador para obtener lo que necesita para su investigación

Modelamiento. - Reproducción ideal y concreta de un objeto o de un fenómeno con fines de estudio y experimentación.

Métodos. - Es la manera de alcanzar los objetivos o el procedimiento para ordenar la actividad.

Módulo de fuzificación (Difusor). - Consiste en recibir unos valores numéricos y asociarles predicados vagos por medio de unos conjuntos borrosos.

Módulo de base de reglas. - Es una base de datos generada por experiencia, sentido común o intuición y es utilizada para gobernar el comportamiento del sistema, son de la forma SI – ENTONCES.

Módulo de inferencia. - Evalúa que regla (o reglas) del sistema se activará ante determinado valor de entrada.

Módulo de defuzificación. - Consiste en obtener un valor numérico para cada una de las salidas del sistema a partir de los conjuntos borrosos a los que pertenece.

Simulación. - Es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital

Técnicas. - La técnica es un conjunto de reglas y operaciones para el manejo de los instrumentos que auxilia al individuo en la aplicación de los métodos.

CAPITULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

Hipótesis general

El compensador estático con control difuso permite mejorar el factor de potencia.

Hipótesis específica

El modelamiento del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia.

La simulación del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia.

3.2. Definición conceptual de variables

La planta a investigar es un compensador estático de potencia, las señales de control por modulación de ancho de pulso (PWM), generados por el controlador difuso, para la etapa rectificadora (AC /DC), esto se compara con un voltaje de referencia, el cual permitirá regular el voltaje de salida.

Las señales de control de Modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM), para la etapa inversora (DC/ AC), permitirá como el anterior, regular el voltaje AC, la frecuencia del inversor, el factor de potencia (FP), de esta manera obtener una mejora en la calidad de energía a la salida.

3.3. Operacionalización de variables

Considerando al compensador estático de potencia, como dos etapas de potencia controladas:

- Una variación en el voltaje de referencia del controlador aplicado al convertidor AC/DC producirá una variación en el voltaje de salida del convertidor y por consiguiente una variación de voltaje a la salida del inversor.
- Una variación en el voltaje de referencia, equivalente a una frecuencia de referencia del controlador difuso aplicado al inversor, producirá una variación de frecuencia a la salida del inversor.



Tabla 2 Operacionalización de variables

Hipótesis general	Variables		Definición
El compensador estático con control difuso permite mejorar el factor de potencia.	Independiente	u	Compensador Estático.
		x	Control difuso
	Dependiente	y	Factor de potencia

CAPITULO IV: DISEÑO METODOLOGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación es de tipo científico, cuantitativa porque tiene un tratamiento de matemáticas avanzadas, aplicadas al campo de los Sistemas de Control Automático Avanzado (Control difuso).

Se realiza el diseño de la investigación para alcanzar los objetivos de estudio, contestar las interrogantes planteadas y analizar la certeza de la hipótesis formulada en un contexto particular. En este sentido es que se plantea el siguiente procedimiento:

Modelamiento matemático de la planta a controlar,

Primeramente, se diseñó un circuito rectificador controlado de onda completa (AC/DC), luego se diseñó el circuito inversor (DC/AC). con dispositivos semiconductores de potencia (Mosfet's o Igbt's).

Se diseñó un controlador difuso para el circuito compensador estático (Statcom).

La generación de voltaje con la técnica Modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM), con el control difuso, se logró seleccionando adecuadamente y por un tiempo determinado, los estados de los interruptores del circuito inversor puente, en cada periodo de conmutación, el cual permite regular la potencia de salida, así como el factor de potencia (FP).

Luego se simuló el circuito en cuestión.

4.2. Método de investigación

El método de investigación fue de tratamiento matemático, es decir analítico, aplicando las propiedades de los sistemas de control difuso. Se usó Matlab para las operaciones complejas y el análisis de la respuesta en el tiempo.

4.3. Población y muestra

El presente trabajo no es de tipo estadístico



4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

Como el trabajo de investigación fue de tratamiento matemático y haciendo uso de un software, no ocupa un lugar geográfico. En todo caso se desarrollo en el ambiente de mi domicilio, que cuenta con biblioteca personal, y se encuentra instalada mi computadora personal con una impresora y además el servicio de Internet.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

El presente trabajo no es de tipo estadístico

4.6. Análisis y procesamiento de datos.

El presente trabajo no es de tipo estadístico, ni de adquisición de datos.



CAPITULO V: RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

Para probar el sistema bajo condiciones de operación distintas a la de régimen permanente se simula el ingreso de una carga resistiva-inductiva de 15 Mw - 22 MVAR mediante el cierre programado de un Interruptor seteado entre [0,15 - 0,25] seg, con la cual hace evidente, la necesidad de compensación de reactivos y regulación de tensión. El procedimiento se lleva a cabo tomando las mediciones del lado de la fuente y del lado de la carga con y sin Statcom.

Las gráficas de la Fig. 14 y 15 muestran una simulación de 0.3 segundos en régimen transitorio de la potencia activa/reactiva en la fuente barra B-1, con y sin Statcom. El interruptor BK1 cerrado y el interruptor BK2 de la carga no lineal programado de [0,15 - 0,25] seg.

En la Fig. 15 se observa cómo responde el sistema ante la entrada brusca de la carga inductiva sin el Statcom, en la Fig. 15 se observa la potencia activa y reactiva en p.u. con respecto a la Fig. 14, donde se puede apreciar la regulación de energía reactiva.

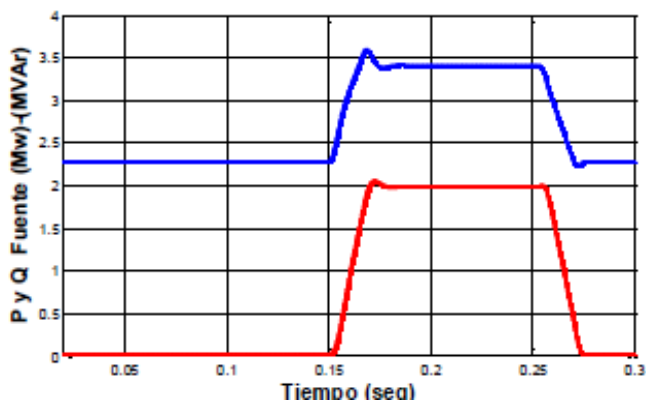


Figura 14 Potencia P-Q fuente sin Statcom

Fuente: Autoría propia (UNAC-2024)

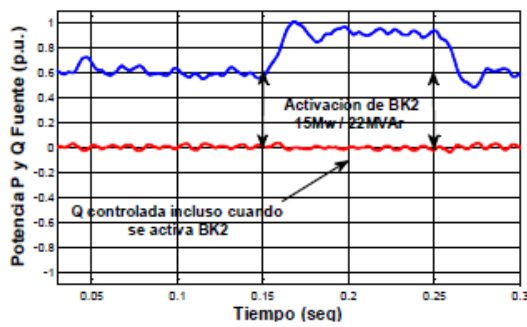


Figura 15 Potencia P-Q fuente con Statcom
Fuente: Autoría propia (UNAC-2024)

5.2 Resultados inferenciales

Analizando el comportamiento del Factor de Potencia sin el Statcom, observamos como en la Fig. 16 el mismo cae hasta niveles 0,863 con la interrupción de la carga inductiva durante el periodo de 0,15 y 0,25 seg. Por otro lado, en la Fig. 17 se observa la regulación del FP en la unidad cuando el Statcom está operando.

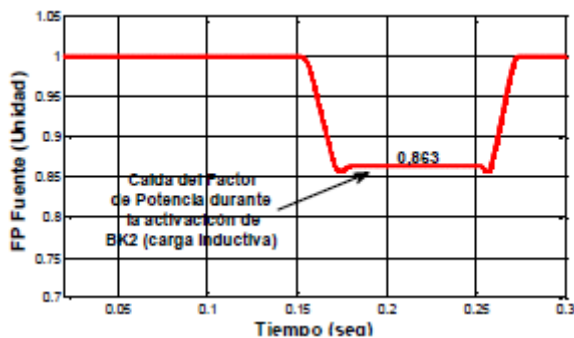


Figura 16 Factor de potencia fuente sin Statcom
Fuente: Autoría propia (UNAC-2024)

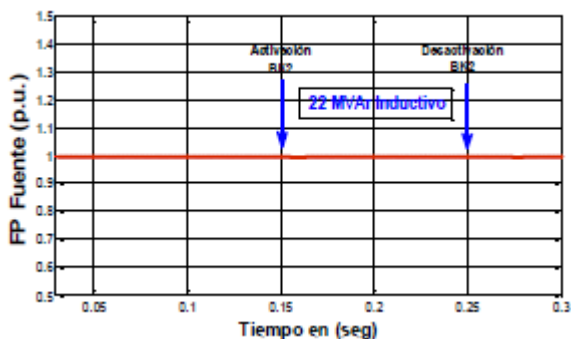


Figura 17 Factor de Potencia fuente con Statcom
Fuente: Autoría propia (UNAC-2024)

CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Se está contrastando las hipótesis, no necesitando fórmulas matemáticas, es decir; se demuestra:

Hipótesis general

El compensador estático con control difuso permite mejorar el factor de potencia.

Hipótesis específica

El modelamiento del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia.

La simulación del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.

Se confirma la investigación de DEYBIS APONTE Primo (2005, p.01). En los resultados que obtuvo el investigador se visualiza cómo la nueva tecnología de compensador de potencia reactiva puede mejorar el funcionamiento del sistema eléctrico (SE). En conclusión, con el presente trabajo de investigación se recomienda el uso del Statcom para tener una mejor respuesta ante cambios de operación del sistema eléctrico (SE).

6.3 Responsabilidad ética

De acuerdo a lo establecido en el artículo 5 de la Ley N° 30220, uno de los principios que rigen a las universidades peruanas es la ética pública y profesional concordante con lo dispuesto en el artículo 12 del Estatuto de la Universidad Nacional del Callao, esta investigación cumple con todos los requisitos señalados en las disposiciones vigentes.



CONCLUSIONES

Se comprueba en el modelamiento y simulación que el control difuso presenta un buen desempeño en el control de un inversor (Statcom), ofreciendo una buena regulación de energía reactiva y compensación de reactivos en régimen transitorio.

Los resultados obtenidos mediante Matlab/simulink, demuestran que el control difuso mantiene una buena respuesta rápida y estable para el sistema eléctrico (SE), cuando es sometida a perturbaciones.

Con el modelamiento de un compensador (Statcom), utilizada puede regularse el Factor de Potencia en un sistema eléctrico (SE).

En la Simulación, se compenso una carga de tipo inductivo que tenía una caída del factor de potencia hasta 0,86, se logró un factor de potencia de 1.



RECOMENDACIONES

En el modelamiento y simulación, este tipo de control avanzado (lógica difusa), tiene la capacidad de manejar data impredecible, recomendándose su utilidad, en procesos complejos, que son muy difícil de realizarlo por métodos clásicos. Al producirse perturbaciones aleatorias en una red eléctrica, es recomendable el uso de control avanzado (lógica difusa).



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. 5ta edición. Madrid: Pearson Educación, 2010.
- [2] R. C. Dorf y R. H. Bishop. *Sistemas de control moderno*. 10ma edición. Madrid: Pearson Educación, 2005.
- [3] G. F. Franklin, J. D. Powell y A. Emami-Naeini. *Control de sistemas dinámicos con retroalimentación*. Delaware: Addison-Wesley Iberoamericana, S.A., 1991.
- [4] N. S. Nise. *Sistemas de control para ingeniería*. 3ra edición. México, D.F.: Grupo editorial patria, 2010.
- [5] P. H. Lewis y Chang Yang. *Sistemas de control en ingeniería*. Madrid: Prentice Hall Iberia, 1999.
- [6] H. Kwakernaak, R. Sivan. *Linear Optimal Control Systems*. New York: Jhon Wiley & Sonns, 1972.
- [7] S. Carrasco. *Metodología de la investigación científica*. Lima: Editorial San Marcos, 2018.
- [8] H. Ñaupas, E. Mejía, E. Novoa y A. Villagómez. *Metodología de la investigación Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis*. 4ta edición. Bogotá: Ediciones de la U, 2014.
- [9] R. Pino. *Metodología de la investigación*. Lima: Editorial San Marcos, 2018.
- [10] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista. *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw Hill, 2010.
- [11] Duarte Oscar G. Unfuzzy programa bajo Windows para sistemas de control difuso. Universidad Nacional de Colombia
- [12] R. Galeas y J.A. Galeas. *Matlab y Simulink Aplicado a la Ingeniería*. Lima: Grupo Editorial Megabyte S.A.C., 2017.
- [13] Ebrahim, Mamdani; Robert Babuska. Fuzzy Control. Scholarpedia 2008 <http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_control> (19 de Julio de 2012).
- [14] Pereyra Rodríguez Nicolás. Control de voltaje de un compensador estático de VAR's utilizando lógica difusa sintonizando por tabú. México, D.F, 2006. Trabajo de grado (Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica). IPN. SEPI ESIME, Zacatenco.



ANEXOS



Matriz de consistencia

Matriz de consistencia del proyecto de investigación				
Tema: “ MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO CON CONTROL DIFUSO PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA ”				
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p><u>Problema general</u> ¿Cómo el compensador estático con control difuso mejora el factor de potencia?</p>	<p><u>Objetivo general</u> Modelamiento y simulación de un compensador estático, con control difuso.</p>	<p><u>Hipótesis general</u> El compensador estático con control difuso permite mejorar el factor de potencia.</p>		<p><u>Tipo de investigación</u> La investigación es de tipo científico, cuantitativa porque tiene un tratamiento de matemáticas avanzadas, aplicadas al campo de los Sistemas de Control Automático Avanzado (Control difuso). Cuantitativa aplicada al campo de los Sistemas de Control Automático.</p>
<p><u>Problema Especifico</u> ¿Cómo el modelamiento del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencial ¿Cómo la simulación del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia?</p>	<p><u>Objetivo especifico</u> Modelamiento del compensador estático, con control difuso mediante Matlab/simulink Simulación de un compensador estático con control difuso mediante Matlab/simulink.</p>	<p><u>Hipótesis especifico</u> El modelamiento del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia. La simulación del compensador estático, con control difuso permite mejorar el factor de potencia.</p>	<p><u>Variable independiente</u> Compensador Estático. <u>Variable dependiente</u> Control difuso. Factor de potencia (FP)</p>	<p><u>Diseño de la investigación</u> Modelamiento matemático de la planta a controlar, Primeramente, se diseñará un circuito rectificador controlado de onda completa (AC/DC), luego se diseñará el circuito inversor (DC/AC). con dispositivos semiconductores de potencia (Mosfet's o Igt's). Se diseñará un controlador difuso para el circuito compensador estático, que se explicará en el trabajo. La generación de voltaje con la técnica Modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM), con el control difuso, se logra seleccionando adecuadamente y por un tiempo determinado, los estados de los interruptores del circuito inversor puente, en cada periodo de conmutación, el cual permite regular la potencia de salida, así como el factor de potencia <u>Método de la investigación</u> El método de investigación es de tratamiento matemático, es decir analítico, aplicando las propiedades de los sistemas de control difuso. Se usará Matlab/simulink, para las operaciones complejas y el análisis de la respuesta en el tiempo.</p>

