

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

ESCUELA DE POSGRADO

UNIDAD DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



“MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UN COMPENSADOR  
ESTÁTICO DE POTENCIA REACTIVA DE DISTRIBUCIÓN  
TRIFÁSICO, BASADO EN UN INVERSOR SPWM”

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR  
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOR

RUSSELL CÓRDOVA RUIZ

ASESOR Dr. Ing. JACOB ASTOCONDOR VILLAR

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Sistema de automatización,  
sistemas de control










Callao, 2023

PERÚ

## Document Information

|                   |  |
|-------------------|--|
| Analyzed document | TESIS DOCTORAL RCR.doc (D171012278)    |
| Submitted         | 6/20/2023 5:35:00 PM                   |
| Submitted by      |  |
| Submitter email   | rcordovar@unac.edu.pe                  |
| Similarity        | 3%                                     |
| Analysis address  | free.posgrado.unac@analysis.arkund.com |

## Sources included in the report

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| <b>SA</b> | <b>Tesis de Maestria - Martin Montalvo - 2 de marzo 2022.pdf</b><br>Document Tesis de Maestria - Martin Montalvo - 2 de marzo 2022.pdf (D129270679) |  1  |
| <b>SA</b> | <b>Urkund Report - Tesis1.docx (D13207347).pdf</b><br>Document Urkund Report - Tesis1.docx (D13207347).pdf (D13286812)                              |  5 |
| <b>SA</b> | <b>Proyecto_Tecnico_Investigativo_Astudillo_Lema.pdf</b><br>Document Proyecto_Tecnico_Investigativo_Astudillo_Lema.pdf (D29307775)                  |  3 |
| <b>SA</b> | <b>9620-Aponte Primo, Luis Deybis_.pdf</b><br>Document 9620-Aponte Primo, Luis Deybis_.pdf (D37053969)  |  4 |
| <b>SA</b> | <b>2022-09-26_AGUAYO HECTOR_TESIS.pdf</b><br>Document 2022-09-26_AGUAYO HECTOR_TESIS.pdf (D144878334)   |  2 |
| <b>SA</b> | <b>Trabajo de suficiencia - M4 -Williams Arellan Cerna.pdf</b><br>Document Trabajo de suficiencia - M4 -Williams Arellan Cerna.pdf (D142014204)     |  1 |
| <b>SA</b> | <b>valenzuela_db_.pdf</b><br>Document valenzuela_db_.pdf (D30705633)  |  1 |
| <b>SA</b> | <b>lenin-gavilanez.docx</b><br>Document lenin-gavilanez.docx (D15331435)  |  2 |
| <b>SA</b> | <b>TESIS-CRISTIAN ANDRE DE LA TORRE UGARTE CHINCHAY-L1.docx</b><br>Document TESIS-CRISTIAN ANDRE DE LA TORRE UGARTE CHINCHAY-L1.docx (D148925958)   |  1 |

## Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
ESCUELA DE POSGRADO  
UNIDAD DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## INFORMACIÓN BÁSICA

### **FACULTAD**

Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

### **UNIDAD DE INVESTIGACIÓN**

Unidad de Investigación de Posgrado

### **TITULO**

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO DE POTENCIA REACTIVA DE DISTRIBUCIÓN TRIFÁSICO, BASADO EN UN INVERSOR SPWM.

### **AUTOR:**

CÓRDOVA Ruiz Russell / Código ORCID: 0000-0002-1172-9839 / DNI: 25621772.

### **ASESOR:**

Dr. Ing. Astocondor Villar, Jacob / Código ORCID:0000-0003-1422 DNI:09020032

### **LUGAR DE EJECUCIÓN:**

Laboratorio de Control y Automatización FIEE–UNAC- LIMA-Perú

### **UNIDAD DE ANÁLISIS:**

Área de Electrónica de Potencia

### **TIPO/ ENFOQUE/ DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:**

Descriptivo, cuantitativa, no experimental

### **TEMA OCDE:**

2.02.03 – Sistema de automatización, sistemas de control

## HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

### **MIEMBROS DEL JURADO:**

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| Dr ADAN ALMICAR TEJADA CABANILLAS   | PRESIDENTA |
| DR. CESAR AUGUSTO SANTOS MEJIA      | SECRETARIA |
| DR. SANTIAGO LINDER RUBIÑOS JIMENEZ | MIEMBRO    |
| DR. FERNANDO MENDOZA APAZA          | MIEMBRO    |

**ASESORA:** Dr.Ing.JACOB ASTOCONDOR VILLAR

**N° de libro:** 01

**N° de folio:** 136

**N° de acta:** 011 – UPG-FIEE

**Fecha de aprobación de tesis:** 13 de diciembre de 2023

## Document Information

|                   |  |
|-------------------|--|
| Analyzed document | TESIS DOCTORAL RCR.doc (D171012278)    |
| Submitted         | 6/20/2023 5:35:00 PM                   |
| Submitted by      |  |
| Submitter email   | rcordovar@unac.edu.pe                  |
| Similarity        | 3%                                     |
| Analysis address  | fiee.posgrado.unac@analysis.arkund.com |

## Sources included in the report

|    |   |   |
|----|---|---|
| SA | <b>Tesis de Maestría - Martin Montalvo - 2 de marzo 2022.pdf</b><br>Document Tesis de Maestría - Martin Montalvo - 2 de marzo 2022.pdf (D129270679) | 1 |
| SA | <b>Urkund Report - Tesis1.docx (D13207347).pdf</b><br>Document Urkund Report - Tesis1.docx (D13207347).pdf (D13286812)                              | 5 |
| SA | <b>Proyecto Tecnico Investigativo Astudillo Lema.pdf</b><br>Document Proyecto_Tecnico_Investigativo_Astudillo_Lema.pdf (D29307775)                  | 3 |
| SA | <b>9620-Aponte Primo, Luis Deybis_.pdf</b><br>Document 9620-Aponte Primo, Luis Deybis_.pdf (D37053969)  | 4 |
| SA | <b>2022-09-26_AGUAYO HECTOR_TESIS.pdf</b><br>Document 2022-09-26_AGUAYO HECTOR_TESIS.pdf (D144878334)   | 2 |
| SA | <b>Trabajo de suficiencia - M4 -Williams Arellan Cerna.pdf</b><br>Document Trabajo de suficiencia - M4 -Williams Arellan Cerna.pdf (D142014204)     | 1 |
| SA | <b>valenzuela_db_.pdf</b><br>Document valenzuela_db_.pdf (D30705633)  | 1 |
| SA | <b>lenin-gavilanez.docx</b><br>Document lenin-gavilanez.docx (D15331435)  | 2 |
| SA | <b>TESIS-CRISTIAN ANDRE DE LA TORRE UGARTE CHINCHAY-L1.docx</b><br>Document TESIS-CRISTIAN ANDRE DE LA TORRE UGARTE CHINCHAY-L1.docx (D148925958)   | 1 |

## Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
ESCUELA DE POSGRADO  
UNIDAD DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

## **DEDICATORIA**

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

# ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| ÍNDICE .....  | 1  |
| TABLAS DE CONTENIDO .....                             | 3  |
| RESUMEN .....   | 6  |
| ABSTRACT .....  | 8  |
| SOMMARIO .....  | 10 |
| INTRODUCCIÓN .....                                    | 12 |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                    | 13 |
| 1.1 Descripción de la realidad problemática .....     | 13 |
| 1.2 Formulación del problema .....                    | 13 |
| Problema general.....                                 | 13 |
| Problemas específicos .....                           | 14 |
| 1.3. Objetivos.....                                   | 14 |
| Objetivo general.....                                 | 14 |
| Objetivos específicos .....                           | 14 |
| 1.4. Limitantes de la investigación.....              | 15 |
| II. MARCO TEÓRICO .....                               | 16 |
| 2.1 Antecedentes: Internacional y nacional .....      | 16 |
| Antecedentes internacionales .....                    | 16 |
| Antecedentes nacionales .....                         | 18 |
| 2.2 Bases teóricas .....                              | 19 |
| 2.3 Conceptual.....                                   | 38 |
| 2.4. Definiciones de Términos Básicos.....            | 45 |
| III. HIPÓTESIS Y VARIABLES .....                      | 47 |
| 3.1. Hipótesis (general e hipótesis específicas)..... | 47 |
| 3.1.1. Hipótesis general .....                        | 47 |
| 3.1.2. Hipótesis específicas.....                     | 47 |
| 3.2 Definición conceptual de variables .....          | 47 |
| 3.2.1 Operacionalización de variables .....           | 47 |
| IV. DISEÑO METODOLÓGICO .....                         | 49 |



|   |    |
|---|----|
| 4.1. Tipo y diseño de investigación .....                               | 49 |
| 4.2 Método de investigación .....                                       | 64 |
| 4.3 Población y muestra .....   | 64 |
| 4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado.....                        | 64 |
| 4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....  | 64 |
| 4.6 Análisis y procesamiento de datos .....                             | 65 |
| V. RESULTADOS.....  | 66 |
| 5.1 Resultados descriptivos .....                                       | 65 |
| 5.2 Resultados diferenciales .....                                      | 67 |
| VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                                       | 68 |
| 6.1 Contrastación y demostración de hipótesis con los resultados .....  | 68 |
| 6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares .....      | 71 |
| 6.3 Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes ..... | 72 |
| CONCLUSIONES .....  | 73 |
| RECOMENDACIONES .....   | 74 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 75 |
| ANEXOS .....  | 77 |
| A: Matriz de consistencia.....  | 78 |
| MATLAB.....   | 79 |
| Apéndice.....   | 79 |

## TABLAS DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Valores aproximados del factor de potencia para las cargas mas comunes..... | 32 |
| Tabla 2. Resultados del modelo Simulink sin Statcom.....                             | 66 |
| Tabla 3. Resultados del modelo Simulink con Statcom .....                            | 66 |

## TABLA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1. Elementos lineal y no lineal.....</i>   | 19 |
| <i>Figura 2. Forma de onda de corriente.....</i>   | 20 |
| <i>Figura 3. Diagrama fasorial de un circuito resistivo.....</i>                                       | 21 |
| <i>Figura 4. Ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo .....</i>         | 22 |
| <i>Figura 5. Diagrama fasorial correspondiente a las cargas inductivas .....</i>                       | 23 |
| <i>Figura 6. Onda de corriente atrasada 90° con respecto a la tensión .....</i>                        | 23 |
| <i>Figura 7. Diagrama fasorial de un circuito capacitivo.....</i>                                      | 24 |
| <i>Figura 8. Onda de corriente adelantada 90° con respecto a la tensión.....</i>                       | 24 |
| <i>Figura 9. Representa la potencia activa (P) en fase con la tensión (V).....</i>                     | 25 |
| <i>Figura 10. Potencia reactiva en adelanto (QC) o atraso (QL) con respecto a la tensión .....</i>     | 26 |
| <i>Figura 11. Vector resultante (S) de sumar la potencia activa y la potencia reactiva .....</i>       | 27 |
| <i>Figura 12. Triángulo de potencia.....</i>   | 28 |
| <i>Figura 13. Triángulo de potencia en un circuito trifásico.....</i>                                  | 31 |
| <i>Figura 14. Estructura de Statcom.....</i>   | 34 |
| <i>Figura 15. Representación simplificada de un Statcom .....</i>                                      | 36 |
| <i>Figura 16. Circuito equivalente del DStatcom .....</i>  | 41 |
| <i>Figura 17. Diagrama de bloques de un D-Statcom SPWM y PCC.....</i>                                  | 50 |
| <i>Figura 18. Variables para modo de operación del D-Statcom SPWM.....</i>                             | 51 |
| <i>Figura 19. Modos de operación del D-Statcom SPWM.....</i>   | 52 |
| <i>Figura 20. D-Statcom SPWM operando en modo capacitivo e inductivo. ....</i>                         | 53 |
| <i>Figura 21. Diagrama de bloques de un corrector de factor de potencia.....</i>                       | 54 |
| <i>Figura 22. Estructura básica de un D-Statcom SPWM .....</i>   | 54 |
| <i>Figura 23. Diagrama unifilar de un D-Statcom SPWM corrector de factor de potencia .....</i>         | 55 |
| <i>Figura 24. Diagrama unifilar básico para el diseño de un D-Statcom SPWM ..</i>                      | 56 |
| <i>Figura 25. Formas de onda de la señal moduladora, la señal portadora y la señal de salida. ....</i> | 60 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 26. Esquema general del Statcom</i> .....   | 62 |
| <i>Figura 27. Simulación sin Statcom</i> .....  | 68 |
| <i>Figura 28. Forma de onda del voltaje y corriente del sistema trifásico sin Statcom</i> ..... | 68 |

## RESUMEN

Antiguamente era posible generar o absorber potencia reactiva con el uso de bancos de capacitores o inductores, en la última década se han dado avances significativos de los semiconductores de potencia, haciendo posible la aparición de la tecnología FACTS (Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna), la cual tiene como principal componente al inversor estático de potencia, operando como fuente de voltaje regulada (VSI o VSC por sus siglas en inglés). y con un sistema adecuado de control se traduce en un compensador que brinda bajo tiempo de respuesta, ante perturbaciones de calidad de la energía.

La operación del inversor como fuente de voltaje regulada, trae como ventaja adicional, de que puede ser visto como un “generador controlable” que no posee inercia. Esta particularidad ocasiona muy bajos tiempos de respuesta, ante los cambios en los ajustes del mismo.

Esta característica permite la aplicación de esta tecnología para el control estático y dinámico de la operación de los sistemas eléctricos de potencia; en este sentido, el presente trabajo de investigación, describirá el Modelamiento y simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico (D-STATCOM SPWM), basado en un convertidor o inversor SPWM.

El convertidor actúa como compensador de potencia reactiva, el cual permite corregir el factor de potencia, el cual impacta directamente en la factura del servicio de energía eléctrica, cuanto menor sea el factor de potencia mayor es el pago a la compañía del servicio de suministro eléctrico y viceversa. También se ha establecido que, en condiciones estacionarias, se puede ampliar la capacidad de transmisión de potencia de una línea, así como el perfil de tensiones mediante la compensación reactiva [1].

El D-STATCOM SPWM, es usado principalmente en sistemas de transmisión para mantener el voltaje en una barra mediante la compensación dinámica de reactivos capacitivos o inductivos.

También se puede centrar su control en la regulación del factor de potencia, en amortiguar oscilaciones del sistema o una combinación de estos, dependiendo de la aplicación y el nivel de tensión en el cual se desea implementar.

Con este proyecto de investigación, podremos atenuar y eliminar el deterioro de la calidad de energía eléctrica.

Con el Compensador Estático de Distribución (D-STATCOM SPWM), podremos generar e inyectar potencia reactiva o absorber y así mejorar la calidad de energía de suministro eléctrico.

Con el convertidor o inversor SPWM podremos controlar la potencia inyectada a la red eléctrica tanto activa como reactiva.

La importancia del presente trabajo de investigación es principalmente en la línea de generación y aplicación del conocimiento de calidad de la energía al contribuir en la generación de conocimiento del uso de convertidores o inversores trifásicos con modulación de ancho de pulso senoidal aplicados a un compensador de potencia reactiva en sistemas trifásicos.

Así mismo, podrá servir para generar una plataforma de trabajo para diversas aplicaciones de la electrónica de potencia para compensación de potencia reactiva, inyección de energía a la red eléctrica etc.

**Palabras clave:** D-STATCOM, inversor, compensador, potencia reactiva

## ABSTRACT

In the past it was possible to generate or absorb reactive power with the use of banks of capacitors or inductors, in the last decade there have been significant advances in power semiconductors, making possible the appearance of FACTS technology (Flexible Systems of Alternating Current Transmission) , which has as its main component the static power inverter, operating as a regulated voltage source (VSI or VSC for its acronym in English). And with an adequate control system it translates into a compensator that provides a low response time, in case of disturbances in the quality of the energy.

The operation of the inverter as a regulated voltage source, has as an additional advantage, that it can be seen as a "controllable generator" that does not have inertia. This particularity causes very low response times, due to changes in its settings.

This characteristic allows the application of this technology for the static and dynamic control of the operation of the electric power systems; in this sense, the present research work, will describe the modeling and simulation of a static reactive power compensator of three-phase distribution (D-STATCOM SPWM), based on an inverter or SPWM inverter.

The converter acts as a reactive power compensator, which allows correcting the power factor, which directly impacts the electricity service bill, the lower the power factor, the higher the payment to the electric power service company and vice versa. It has also been established that in stationary conditions, the power transmission capacity of a line can be expanded, as well as the voltage profile by means of reactive compensation [1].

The STATCOM is used mainly in transmission systems to maintain the voltage in a bar by dynamic compensation of capacitive or inductive reagents

You can also focus your control on the regulation of the power factor, on damping oscillations of the system or a combination of these, depending on the application and the level of tension in which you want to implement.

With this research project, we can mitigate and eliminate the deterioration of the quality of electrical energy.

With the Static Distribution Compensator (D-STATCOM SPWM), we can generate and inject reactive power or absorb and thus improve the quality of power supply.

With the inverter or SPWM inverter we can control the power injected into the electrical network both active and reactive.

The importance of this research work is mainly in the line of generation and application of knowledge of energy quality by contributing to the generation of knowledge of the use of converters or three-phase inverters with modulation of sinusoidal pulse width applied to a power compensator reactive in three-phase systems.

Likewise, it can be used to generate a work platform for various applications of power electronics for reactive power compensation, power injection to the electrical network, etc.

**Key words:** D-STATCOM, inverter, compensator, reactive power



## SOMMARIO

In precedenza è stato possibile generare o assorbire potenza reattiva utilizzando batterie di condensatori o induttori, negli ultimi dieci anni ci sono stati progressi significativi in semiconduttori di potenza, rendendo possibile l'emergere di tecnologie FATTI (sistemi flessibili AC Transmission) , che ha come componente principale del convertitore statico di potenza, che opera come una sorgente di tensione regolata (VSC VSI o con il suo acronimo). E con un opportuno sistema di controllo si traduce in un buffer che fornisce basso tempo di risposta ai disturbi della qualità dell'alimentazione.

funzionamento inverter come una sorgente di tensione regolata, porta un ulteriore vantaggio che può essere visto come un "generatore controllabile" che non ha inerzia. Questa caratteristica fa sì che i tempi di risposta molto bassi per i cambiamenti nelle impostazioni di esso.

Questa caratteristica permette l'applicazione di questa tecnologia per il controllo statico e dinamico del funzionamento dei sistemi di alimentazione elettrica; a questo proposito, la presente ricerca, descrivono la modellazione e simulazione di una distribuzione di fase potenza reattiva compensatore statico (D-STATCOM SPWM), sulla base di un convertitore o inverter SPWM.

Gli atti inverter come una potenza reattiva di compensazione, che può correggere il fattore di potenza, che influenza direttamente il servizio elettrico fattura, minore è il fattore di potenza maggiore è il servizio di pagamento alimentatore società e viceversa. È stato inoltre dimostrato che in condizioni stazionarie, può aumentare la capacità della linea di trasmissione di potenza e il profilo di tensione per compensazione reattiva [1].

Lo STATCOM viene utilizzato principalmente nei sistemi di trasmissione per mantenere la tensione su una barra da capacitiva dinamica o reagenti compensazione induttivi.

Possono anche concentrarsi controllo nella regolazione del fattore di potenza, ammortizzamento nel sistema o una combinazione di questi, a seconda dell'applicazione e il livello di tensione che deve essere attuato.

Con questo progetto di ricerca, siamo in grado di ridurre ed eliminare il deterioramento della qualità di energia elettrica.

Con Distributed statico compensatore (D-STATCOM-SPWM), possiamo generare ed iniettare o assorbire potenza reattiva e quindi migliorare la qualità di energia elettrica.

Con il convertitore o invertitore SPWM possiamo controllare la potenza alimentata alla rete elettrica attiva e reattiva.

L'importanza di questa ricerca è principalmente nella linea di produzione e applicazione della conoscenza della qualità dell'energia per contribuire alla generazione di conoscenza dell'uso di convertitori o invertitori di fase modulazione di ampiezza di impulso sinusoidale applicata ad un compensatore di potenza sistemi trifase reattivi.

Analogamente, può servire a generare una piattaforma di lavoro per varie applicazioni di elettronica di potenza per la compensazione della potenza reattiva, iniezione energia in rete, ecc.

**Parole chiave:** D-STATCOM, invertitore, compensatore, potenza reattiva.

## INTRODUCCIÓN

En el campo de los semiconductores de potencia, estos han hecho posible la aparición de la tecnología de sistemas flexibles de distribución conocidos como CUPS.

El componente importante es el convertidor estático de potencia (inversor u ondulator), dependiendo del tipo de perturbación y del sistema eléctrico (número de fases) a compensar, es la topología del convertidor (inversor) (selección del modo de operación y de conexión del convertidor). El convertidor seleccionado requiere de un elemento almacenador de energía, el cual incide en su etapa de potencia, el resultado es un convertidor o inversor que, con un adecuado sistema de control, se traduce en un compensador que brinda bajo tiempo de respuesta ante perturbaciones de la calidad de energía.

En el presente trabajo de investigación se desarrolló la modelación y simulación de un compensador estático, para disminuir los efectos del bajo factor de potencia en un sistema eléctrico trifásico con carga R-L, para esto se utiliza un DSTATCOM-SPWM (COMPENSADOR ESTÁTICO DE DISTRIBUCIÓN CON MODULACIÓN DE CONTROL DE PULSO SENOIDAL), este compensador genera e inyecta potencia reactiva o puede absorber si es necesario, logrando mejorar la calidad de energía.

El control de la dirección del flujo de reactivos se basa en la diferencia de magnitudes de voltaje entre la red a compensar y el convertidor (inversor).

El control implementado en el modelo desarrollado está basado en la teoría de control DQ y en técnicas de modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM)., esta técnica se seleccionó debido a sus ventajas comparativas de control respecto a los convencionales y cada vez es más factible desde el punto de vista técnico y económico, conseguir semiconductores que tienen un nivel tolerable de pérdidas al manejar grandes bloques de potencia a frecuencias elevadas de conmutación.

# 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, deteriorando así, la calidad de energía del suministro eléctrico.

Para atenuar y tratar de eliminar el deterioro de la calidad de energía eléctrica, los efectos del bajo factor de potencia en un sistema eléctrico trifásico con carga R-L, se propone el Modelamiento y simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, lo cual genera e inyecta potencia reactiva o puede absorberla si es necesario, para tal efecto, el control de la dirección de flujo de reactivos se basa en la diferencia de magnitudes de voltajes entre la red a compensar y el convertidor o inversor.

Debido a la importancia que tiene el modelamiento y simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, motivo por el cual nos planteamos el siguiente problema:

## 1.2 Formulación del problema

Problema general

PG ¿Cómo el Modelamiento y Simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, evita el deterioro de la calidad de energía del suministro eléctrico?

### Problemas específicos

PE1. ¿Cómo el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mejora la calidad de energía del suministro eléctrico?

PE2. ¿Cómo el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, mejora la calidad de energía del suministro eléctrico de modo tal que puede ser modelado?

PE3. ¿Cómo el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, puede ser simulado?

PE4. ¿Cómo el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM controla la potencia reactiva inyectada o absorbida a la red eléctrica?

### 1.3. Objetivos

#### Objetivo general

OG Modelar y simular un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM para evitar el deterioro de la calidad de energía del suministro eléctrico.

#### Objetivos específicos

OE1 Comprender como el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mejora la calidad de energía del suministro eléctrico.

OE2 Modelar un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, mediante electrónica de potencia para generar e inyectar potencia reactiva o absorber para mejorar la calidad de energía del suministro eléctrico

OE3 Simular el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM.

OE4 Comprobar como el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, controla la potencia reactiva inyectada a la red eléctrica.

#### 1.4. Limitantes de la investigación

**Teórico.** El presente trabajo de investigación es pertinente dentro del contexto del proyecto denominado Modelamiento y simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico (D-STATCOM SPWM), debido a que busca la solución a la problemática basado en un inversor SPWM (detallada en la sección 1.1).

La modelación en ejes dq0 se realizará para la componente fundamental, por lo tanto, sólo se considera la operación del equipo como compensador de potencia reactiva.

Los semiconductores utilizados en el inversor son ideales, sin embargo, las pérdidas por conducción pueden ser representadas a través de la resistencia conectada en el lado AC del inversor.

Todo el análisis matemático se realiza considerando un sistema trifásico balanceado y con cargas de tipo lineal (RL).

No se va a llevar a cabo una implementación física, debido a factores económicos por eso se realizó un análisis netamente teórico basado en simulaciones desarrolladas con el software MATLAB, usando una de sus herramientas llamado SIMULINK.

Se implementó un modelo simulando una generación pequeña y el uso de un compensador estático con elementos de electrónica de potencia provista de un control de potencia con el fin de mejorar la estabilidad del sistema y en general mejorar la regulación del voltaje o tensión.

**Temporal.** La investigación será máximo durante un año.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes: Internacional y nacional

#### Antecedentes internacionales

Según, José H. Vivas (Venezuela, 2004), de la Universidad Simón Bolívar, “Simulación en ATP del compensador estático de potencia reactiva (STATCOM) utilizando técnicas de modulación”

El propósito de este trabajo es modelar y simular en el programa ATP/EMTP el comportamiento del compensador estático de potencia reactiva, mejor conocido como STATCOM ante variaciones balanceadas de carga. El control implementado en el modelo desarrollado está basado en la teoría de control DQ y en técnicas de modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM). Esta técnica se selecciona debido a sus ventajas comparativas de control respecto a las convencionales y porque cada vez es más factible, desde el punto de vista técnico y económico, conseguir semiconductores que tienen un nivel tolerable de pérdidas al manejar grandes bloques de potencia a frecuencias elevadas de conmutación. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad operacional del STATCOM en sistemas de transmisión para el control de voltajes a través del intercambio reactivo. [1]

Según la Tesis Doctoral de Linda Hassaine, (España, 2010), “Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para Inversores. Aplicación a Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red”.

Esta tesis se centra en los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. El objetivo principal es controlar la potencia inyectada a la red desde los paneles solares, optimizando el diseño y el control de los inversores cuando se emplean como interfaz entre la red eléctrica y los sistemas fotovoltaicos para entregar energía a la red con la mejor calidad posible y según las exigencias de la red. El control de la potencia inyectada a la red no solamente incluye el control de la potencia activa, sino también la potencia reactiva.

En esta tesis, se recomienda un algoritmo sencillo y robusto para el diseño del control del inversor conectado a la red, basado en la utilización del control

digital DSPWM “*Digital Sinusoidal Pulse Width Modulation*”, asociado al control del desfase entre la tensión de salida del inversor y la tensión de la red. [2]

Trabajo final para la obtención del título: Ingeniero en Electricidad Especialización Potencia. Espol.Fiec, Guayaquil. 106p. de Aguilar Peñaherrera, Daniel Andrés; Gavilanes Ortiz, Luis Andrés (2012). Diseño y simulación del control de un compensador sincrónico estático (STATCOM).

En este trabajo presenta la aplicación de un compensador estático sincrónico (Static Synchronous Compensator, STATCOM) basado en un convertidor multinivel en cascada (Cascade Multilevel Converter, CMC), que se aplica al punto medio de una línea de transmisión de 138KV en la cual se requiere mejorar el desempeño de la línea en cuanto a capacidad de transmisión se refiere. Se muestran las diferentes topologías multinivel posibles en las que se puede constituir un STATCOM haciendo mayor énfasis en la topología de puentes en cascada, utilizada en este proyecto. También se explica el modo de operación del equipo y se hace el dimensionamiento de sus componentes para sincronizarlo con la red. Para el modelamiento y control del sistema en conjunto se utiliza la herramienta de simulación Simulink de MatLab. Una vez diseñado el control, se simula al STATCOM bajo diferentes escenarios como el incremento del ángulo de transmisión y una caída de voltaje en una de las barras.

López Merino, Jesús; (2016) en su tesis titulado: Estudio y simulación de un STATCOM conectado a una red UC3M Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, España. El objetivo es el análisis del compensador estático síncrono (STATCOM), el cual es una de las aplicaciones de electrónica de potencia más importante dentro de los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS, flexible alternative current transmission system). Este trabajo presenta una útil recopilación de la información encontrada sobre este tema, para ser utilizado por futuros alumnos e investigadores interesados en la materia. STATCOM es un dispositivo de electrónica de potencia compuesto de un convertidor en fuente de tensión, el



cual está conectado en paralelo al sistema de transmisión de corriente alterna. El trabajo proporciona una visión del conjunto de parámetros del control y modelado de las principales aplicaciones del STATCOM para solucionar los problemas de calidad de la energía. En concreto, la regulación de la tensión de la carga y la corrección del factor de potencia mediante el intercambio de potencia reactiva con la red son analizados en detalle. El control del sistema para la compensación de potencia reactiva ha sido implementado con una serie de reguladores PI ajustados, los cuales posibilitan el control de la tensión DC, la corrección del factor de potencia y el control de la tensión de alterna de manera eficiente. Para concluir, los resultados y simulaciones finales del diseño implementado en Matlab/Simulink han sido analizados para demostrar su eficacia en la mejora de los escenarios planteado

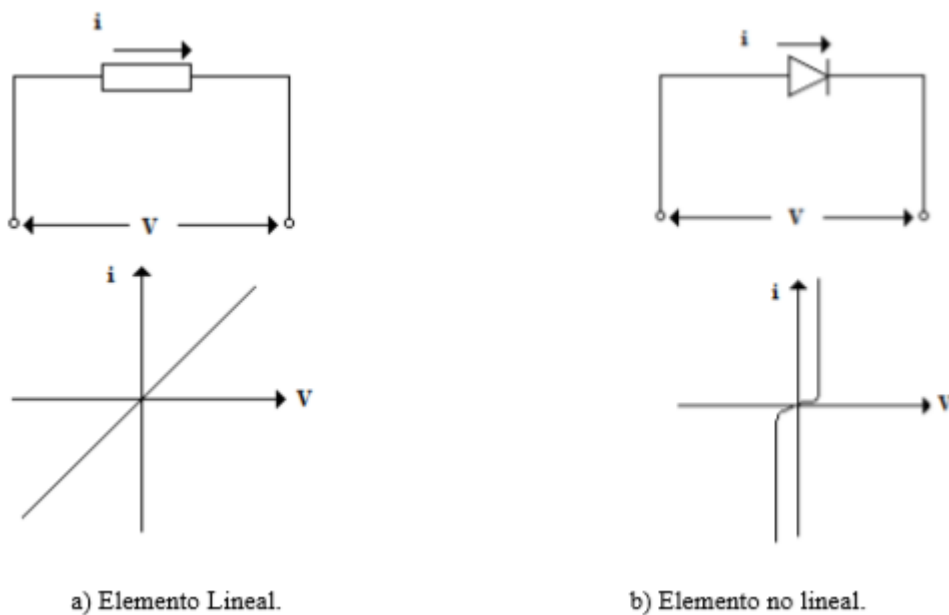
#### Antecedentes nacionales

Deybis Aponte Primo, (2005, p.01), El propósito de este informe es explicar cómo la nueva tecnología de compensador de potencia reactiva puede mejorar el funcionamiento del sistema eléctrico (SEP). Es por ello que se han propuesto nuevas y mejores herramientas para solucionarlo. Por otro lado, una vez que se tenga una nueva herramienta, debe 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). El control del sistema de potencia es un ejemplo típico, que involucra el comportamiento de un motor síncrono después de haber sido perturbado. Las máquinas síncronas son los componentes principales de los sistemas eléctricos de potencia y su desempeño se relaciona directamente con su seguridad y estabilidad en la operación. Las máquinas síncronas interconectadas en una red eléctrica operan sobre un amplio rango, de condiciones de operación, y por ello el uso del Statcom para tener una mejor respuesta ante cambios de operación del SEP. [3]

## 2.2 Bases teóricas

En esta parte se analizan las cargas conectadas a la red eléctrica, algunas de estas cargas provocan variaciones en la forma de onda de tensión y corriente, los métodos para efectuar una compensación de potencia reactiva y como se corrige el factor de potencia estos conceptos, serán de gran utilidad para el estudio de capítulos posteriores.

Una carga es un elemento que consume energía eléctrica, en general existen dos tipos de cargas dentro de los sistemas eléctricos: Cargas lineales y las Cargas no lineales. Una carga es lineal cuando la tensión aplicada a sus extremos y la corriente que pasan por ella están estrechamente relacionadas como se puede observar en la figura 1 a). Se dice que una carga es no lineal cuando la relación tensión/corriente no es constante se representa en la figura 1 b). Las cargas no lineales conectadas a la red de corriente alterna, absorben corrientes que no son senoidales. Esto se observa en la siguiente *Figura 2*.



*Figura 1.* Elementos lineal y no lineal

Fuente: Elaboración propia

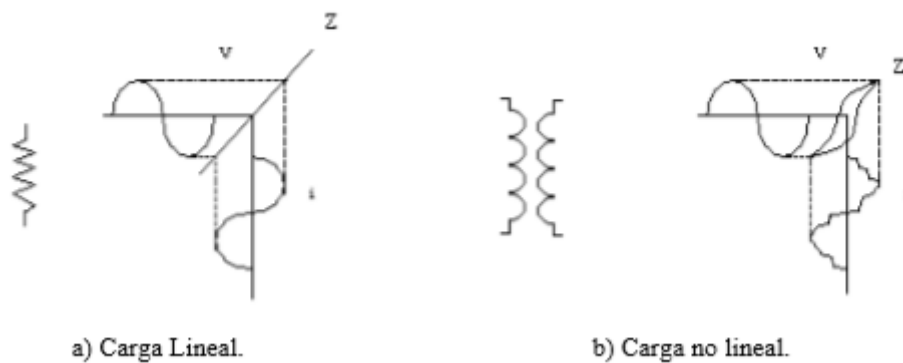


Figura 2. Forma de onda de corriente

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se citan algunas cargas típicas no lineales:

- Equipos electrónicos, en general monofásicos, que internamente trabajan con corriente continua (computadoras, impresora, autómatas programables, etc.).
- Instalaciones de iluminación con lámparas de descarga.
- Transformadores, reactancias con núcleos de hierro, etc., cuya curva de magnetización es no lineal.

## RELACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y TIPOS DE CARGAS EN LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS

En términos generales pueden distinguirse tres tipos de cargas eléctricas al conectar un equipo a una red, por la cual, circula corriente eléctrica expresada en amperes (A) y tensión expresado en volts (V).

### TIPOS DE CARGAS:

#### Cargas resistivas.

Tales cargas son referidas como si tuvieran una resistencia eléctrica designada con la letra R y expresada en Ohm ( $\Omega$ ). Las cargas resistivas pueden encontrarse en equipos como lámparas incandescentes, planchas y estufas eléctricas, en donde la energía que requieren para funcionar es transformada

en energía lumínica o energía calorífica, para tal caso el factor de potencia toma el valor de 1.0.

En un circuito puramente resistivo, la corriente está en fase con la tensión y es función inmediata de la tensión. Por lo tanto, si la tensión y la corriente están en fase, tenemos que:

$$I = \frac{V}{R}$$

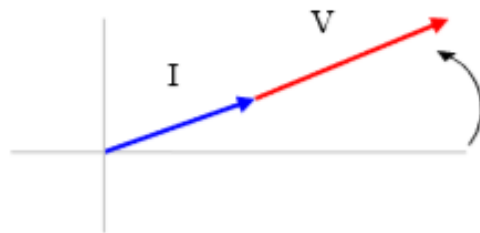
En donde:

I = Corriente eléctrica (A).

V = Tensión eléctrica (V).

R = Resistencia eléctrica ( $\Omega$ ).

En la *Figura 3*, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas resistivas.



*Figura 3. Diagrama fasorial de un circuito resistivo*

*Fuente: Elaboración propia*

La resistencia eléctrica absorbe potencia en Watts es igual a:

$$P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

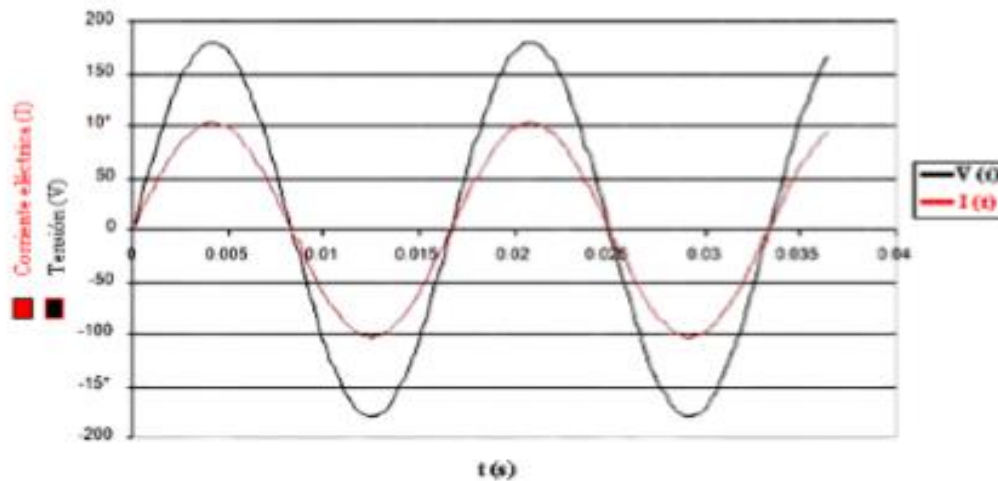
En donde:

P = Potencia activa (W).

Las cargas de tipo resistivo que se encuentran con más frecuencia en los sistemas eléctricos, en el residencial, industrial o comercial son los siguientes:

- Hornos eléctricos.
- Calefactores.
- Planchas.
- Alumbrado incandescente.

En la *Figura 4*, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo y el desfaseamiento que existe entre ellas, la cual es igual a cero, es decir, se encuentran en fase.



*Figura 4. Ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo*

*Fuente: Elaboración propia*

### **Cargas inductivas.**

Las cargas inductivas son encontradas donde hay bobinados involucrados, por ejemplo, en los equipos del tipo electromecánicos como motores, balastos, transformadores, entre otros; además de consumir potencia activa, requieren potencia reactiva para su propio funcionamiento, trabajan con un factor de potencia menor a 1.0. Considerándose que las cargas inductivas, sean el origen del bajo factor de potencia (menores a 0.9). En un circuito puramente inductivo la corriente no está en fase con la tensión va atrasada  $90^\circ$  respecto a la tensión. En la *Figura 5*, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas inductivas.

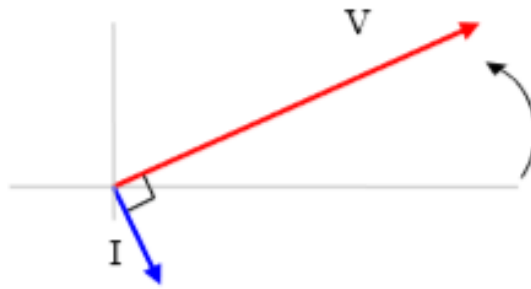


Figura 5. Diagrama fasorial correspondiente a las cargas inductivas

Fuente: Elaboración propia

Algunos equipos de cargas del tipo inductivo son los siguientes:

- Transformadores.
- Motores de inducción.
- Alumbrado fluorescente.
- Máquinas soldadoras.

En la Figura 6, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo y el desfase de  $90^\circ$  de la corriente con respecto a la tensión.

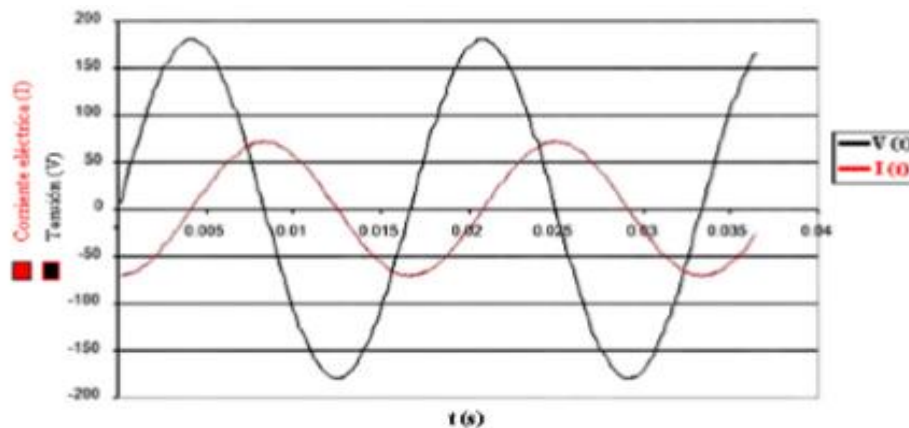


Figura 6. Onda de corriente atrasada  $90^\circ$  con respecto a la tensión

Fuente: Elaboración propia

### Cargas capacitivas.

Las cargas capacitivas se presentan en los capacitores o condensadores y se caracterizan porque la corriente está adelantada respecto de la tensión  $90^\circ$ . En

la *Figura 7*, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas capacitivas.



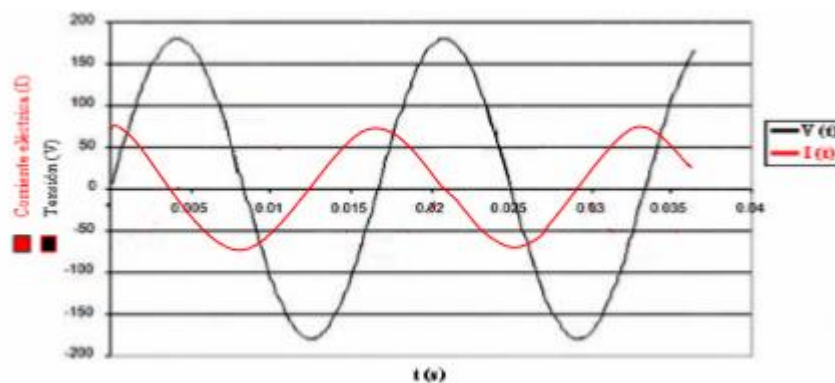
*Figura 7. Diagrama fasorial de un circuito capacitivo*

*Fuente: Elaboración propia*

Las cargas de tipo capacitivo son:

- Bancos de capacitores.
- Motores síncronos.

En un circuito puramente capacitivo, no existe consumo de energía aún si hay corriente circulando. Las cargas capacitivas generan potencia reactiva expresada en volts ampers reactivos (VAR). En la *Figura 8*, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo, para este caso la corriente se adelanta  $90^\circ$  con respecto a la tensión.



*Figura 8. Onda de corriente adelantada  $90^\circ$  con respecto a la tensión*

*Fuente: Elaboración propia*

### **Cargas combinadas.**

En la práctica una carga no está constituida solamente por cargas resistivas, inductivas o capacitivas, estas tres cargas con frecuencia coexisten en los

circuitos eléctricos. Sin embargo, para el caso de una industria la carga más predominante es la carga inductiva, de ahí que sea el factor por el cual se realiza este trabajo. Las diversas cargas son usualmente abastecidas directamente de la red principal de suministro eléctrico, sin embargo, el suministro de potencia reactiva puede ser suministrado por equipos conectados en un punto de la red eléctrica.

### TIPOS DE POTENCIA

Potencia activa (P)

Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en trabajo, la origina la componente de la corriente que está en fase con la tensión. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es, por lo tanto, la realmente consumida por los circuitos. Cuando se habla de demanda eléctrica, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda.

Se designa con la letra P. De acuerdo con su expresión, la ley de Ohm y el triángulo de impedancias:

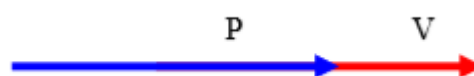
$$P = I.V.\cos\varphi = I^2.Z.\cos\varphi = I^2.R$$

Donde:

Z = Impedancia ( $\Omega$ ).

Sus unidades son W, KW ó MW. Resultado que indica que la potencia activa es debido a los elementos resistivos.

La potencia activa P, por originarse por la componente resistiva, es un vector a cero grados, como se puede apreciar en la *Figura 9*.



*Figura 9. Representa la potencia activa (P) en fase con la tensión (V)*



*Fuente: Elaboración propia*

Potencia reactiva (Q)

Esta potencia no tiene tampoco el carácter realmente de ser consumida y sólo aparecerá cuando existan bobinas o condensadores en los circuitos que generan campos magnéticos y campos eléctricos. La origina la componente de la corriente que está a 90° con respecto a la tensión, en adelanto o en atraso. La potencia reactiva tiene un valor medio nulo, por lo que no produce trabajo útil y se designa con la letra Q.

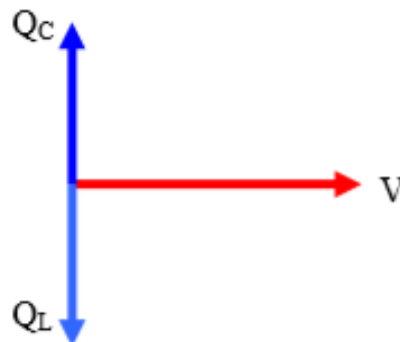
A partir de su expresión:

$$Q = I.V.\sin\phi = I.ZI\sin\phi = S.\sin\phi$$

Donde:

S = Potencia aparente o total (KVA o MVA).

Sus unidades son VAR ,KVAR o MVAR. Lo que reafirma en que esta potencia es debida únicamente a los elementos reactivos, los cuales pueden ser del tipo inductivo  $Q_L$  o capacitivo  $Q_C$ , como se observa en la *Figura 10*.



*Figura 10. Potencia reactiva en adelanto (QC) o atraso (QL) con respecto a la tensión*

*Fuente: Elaboración propia*

La compañía eléctrica mide la energía reactiva con el contador (KVARh) y si se superan ciertos valores, incluye un término de penalización por reactiva en la factura eléctrica

## Potencia aparente (S)

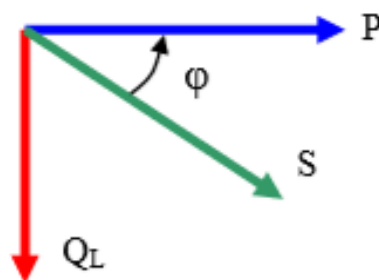
La potencia aparente (también llamada compleja) de un circuito eléctrico de corriente alterna es la suma, por ser la potencia total es el vector resultante de sumar la potencia activa y la potencia reactiva, dicho diagrama fasorial se muestra en de la *Figura 11*

Esta potencia no es la realmente consumida o útil, salvo cuando el factor de potencia es la unidad ( $\cos \phi=1$ ) ya que entonces la potencia activa es igual a la potencia aparente, esta potencia también es indicativa de que en la red de alimentación de un circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con la que van a “almacenar” bobinas y condensadores. Se la designa con la letra S.

La ecuación para calcular la potencia aparente es:

$$S = I \cdot V$$

Sus unidades son VA, KVA o MVA.



*Figura 11. Vector resultante (S) de sumar la potencia activa y la potencia reactiva*

*Fuente: Elaboración propia*

## El triángulo de potencia

El llamado triángulo de potencias es la mejor forma de observar y comprender de forma gráfica qué es el factor de potencia ó  $\cos \phi$  y su estrecha relación con los restantes tipos de potencia presentes en un circuito eléctrico de corriente alterna, además de observar la interacción de una potencia con respecto a las otras dos ya que al modificar una potencia repercutiría en la modificación de las otras dos potencias.

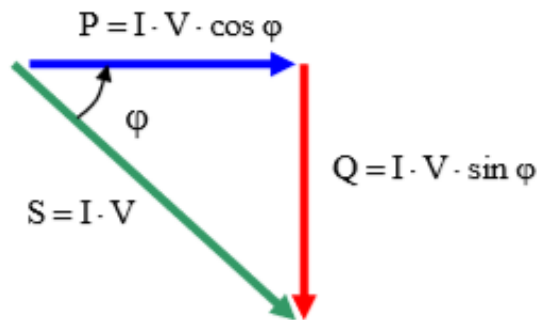


Figura 12. Triángulo de potencia

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el triángulo de la *Figura 12*, el factor de potencia ó  $\cos \phi$  representa el valor del ángulo que se forma al representar gráficamente la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), es decir, la relación existente entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida por la carga o el consumidor conectado a un circuito eléctrico de corriente alterna. Esta relación se puede representar también, de forma matemática, por medio de la siguiente ecuación:

$$\cos \phi = \frac{P}{S}$$

De aquí se define también que:

$$S = P + jQ$$

Donde:

P = Potencia activa (W)

jQ = Potencia reactiva inductiva (VAR).

S = Potencia aparente (VA)

El resultado de esta operación será 1 o un número fraccionario menor que 1 en dependencia del factor de potencia que le corresponde a cada equipo o dispositivo en específico. Ese número responde al valor de la función trigonométrica “coseno”, equivalente a los grados del ángulo que se forma entre las potencias (P) y (S).

Si el número que se obtiene como resultado de la operación matemática es un decimal menor que 1 (como por ejemplo 0,95), dicho número representará el factor de potencia correspondiente al desfase en grados existente entre la intensidad de la corriente eléctrica y la tensión en el circuito de corriente alterna.

Lo ideal sería que el resultado fuera siempre igual a 1, pues así habría una mejor optimización y aprovechamiento del consumo de energía eléctrica, o sea, habría menos pérdida de energía no aprovechada y una mayor eficiencia de trabajo en los generadores que producen esa energía.

En los circuitos de resistencia, el factor de potencia siempre es 1, porque como ya vimos anteriormente, en ese caso no existe desfase entre la intensidad de la corriente y la tensión.

En los circuitos inductivos, como ocurre con los motores, transformadores de tensión y la mayoría de los dispositivos o aparatos que trabajan con algún tipo de enrollado o bobina, el valor del factor de potencia se muestra con una fracción decimal menor que 1 (como por ejemplo 0,8), lo que indica el retraso o desfase que produce la carga inductiva en la senoide correspondiente a la intensidad de la corriente con respecto a la senoide de la tensión.

### **MÉTODOS DE COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA**

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia de alta tensión se presentan, de vez en cuando, situaciones tales como una demanda anormal de reactivos, esto es, que dicha demanda sobrepasa la aportación que de ellos hacen algunos elementos de la red, obligando a los generadores a bajar su factor de potencia para suministrar los reactivos complementarios. El objetivo de la compensación reactiva es que la potencia aparente sea lo más parecida posible a la potencia activa.

El costo de generar, transmitir y transformar los reactivos, en el camino a su consumo, invita a realizar algunas consideraciones con respecto a los elementos que consumen estos reactivos, imponiendo la necesidad de localizar, operar y proyectar los equipos compensadores, de tal forma que estos no alteren el funcionamiento normal del sistema al cual se conecta. Los mecanismos de compensación más empleados son:

## **COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE MÁQUINAS SINCRÓNICAS.**

Las máquinas sincrónicas pueden funcionar como aportadores de potencia reactiva funcionando en vacío, siendo en este caso conocidos como capacitores sincrónicos. La generación de potencia reactiva depende de la excitación, necesitando ser sobreexcitados para poder satisfacer sus propias necesidades de energía reactiva y entregar a su vez energía reactiva al sistema, es decir un motor síncrono diseñado para trabajar en vacío y con un amplio rango de regulación, estas máquinas síncronas son susceptibles de trabajar con potencia reactiva inductiva o capacitiva según el grado de excitación del campo. Si están sobre excitadas se comportan como condensadores. Por el contrario, si están sub-excitadas se comportan como inductancias.

La potencia de un capacitor o condensador sincrónico en condiciones de sobreexcitación está limitada por la temperatura, en condiciones de sub-excitación, la potencia queda limitada por la estabilidad de la máquina. Este tipo de compensación no es muy utilizada, se utiliza sólo en el caso de que existan en la instalación motores sincrónicos de gran potencia (mayores a 200 HP) que funcionan por largos períodos de tiempo.

## **COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE CEV'S.**

Un compensador estático de VAR (CEV'S), se emplea para compensar potencia reactiva, usando un control de la magnitud de tensión, en un bus particular de un sistema eléctrico de potencia. Estos dispositivos comprenden el banco de capacitores fijo o conmutado (controlado) o un banco fijo y un banco de reactores conmutados en paralelo, se emplean principalmente en alta tensión debido a la conmutación para controlar la compensación.

## **COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA MEDIANTE BANCOS DE CAPACITORES**

Este método es el que se utiliza en la actualidad en la mayoría de las instalaciones industriales, dado que es más económico y permite una mayor flexibilidad. Se pueden fabricar en configuraciones distintas. Sin embargo, son muy sensibles a las armónicas presentes en la red, los bancos de capacitores

elevan el factor de potencia, con lo cual aumenta la potencia transmitida por la línea porque no necesita conducir la potencia reactiva.

### **CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA**

La finalidad de corregir el factor de potencia es reducir o eliminar el costo de energía reactiva en la factura de electricidad.

### **FACTOR DE POTENCIA**

Es la relación de la potencia activa  $P$ , con la potencia aparente  $S$ , es decir la proporción de potencia que se transforma en trabajo útil ( $P$ ) de la potencia total ( $S$ ) requerida por la carga. Bajo condiciones de tensiones y corrientes senoidales el factor de potencia es igual al  $\text{Cos}(\varphi)$ , tal y como se mostró en el análisis del Triángulo de Potencia.

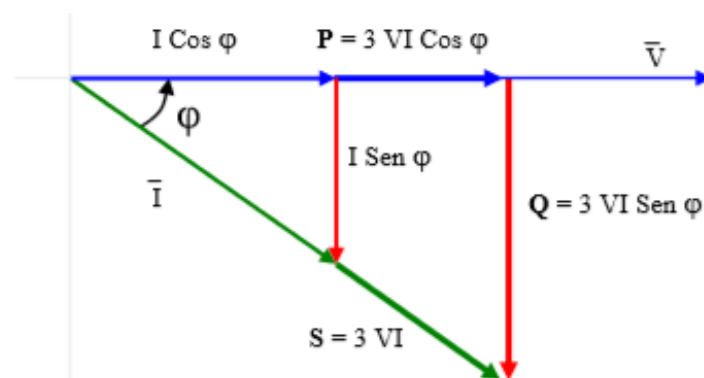
En un circuito trifásico equilibrado la potencia activa ( $P$ ), reactiva ( $Q$ ) y aparente ( $S$ ) se expresan como:

$$P = 3 VI \text{Cos } \varphi$$

$$Q = 3 VI \text{Sen } \varphi$$

$$S = 3 VI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

A continuación, en la *Figura 13* se presenta el diagrama vectorial de potencias, para una carga inductiva:



*Figura 13. Triángulo de potencia en un circuito trifásico*

*Fuente: Elaboración propia*

Donde:

$V$  = Tensión fase-neutro (V).

$I$  = Corriente de fase (A).

En este diagrama vectorial se puede apreciar que, para una potencia activa (P) dada, la corriente ( I ) y la potencia aparente ( S ) son mínimas cuando el ángulo de desfase es igual a  $0^\circ$  ( $\varphi = 0^\circ$ ) ó lo que es equivalente cuando el  $\cos \varphi = 1$ .

A continuación, se presenta en la Tabla 1 los valores aproximados del factor de potencia para las cargas más comunes:

Tabla 1. *Valores aproximados del factor de potencia para las cargas más comunes*

| Aparato  | Carga | Cos $\phi$ |
|--|-------|------------|
| Motor asíncrono                                  | 0%    | 0.17       |
|  | 25%   | 0.55       |
|  | 50%   | 0.73       |
|  | 75%   | 0.8        |
|  | 100%  | 0.85       |
| Lámpara incandescentes                           |       | 1          |
| Lámparas fluorescentes                           |       | 0,5        |
| Lámparas de descarga                             |       | 0,4 a 0,6  |
| Hornos de resistencia                            |       | 1          |
| Hornos de inducción                              |       | 0,85       |
| Máquinas de soldar por resistencia               |       | 0,8 a 0,9  |
| Soldadora de arco monofásica                     |       | 0,5        |
| Soldadora de arco con transformador rectificador |       | 0,7 a 0,9  |
| Hornos de arco                                   |       | 0,8        |

*Fuente: Elaboración propia*

En muchas instalaciones eléctricas de la industria, hay grandes consumos de corriente. Este consumo se agrava más cuando se trabaja con muchos motores (carga inductiva), que causan que exista un gran consumo de corriente reactiva que normalmente es penalizada por las empresas que distribuyen energía.

Cuando esta situación se presenta, se dice que se tiene un bajo factor de potencia. El siguiente, es un método para lograr mejorar el factor de potencia, reducir el consumo de corriente y evitar cualquier penalización económica.

### **Introducción a los FACTS:**

FACTS (Flexible Alternating current Transmission System), se refiere a una familia de dispositivos basados en electrónica de potencia, para mejorar la capacidad de control y la estabilidad del sistema de corriente alterna y para aumentar la capacidad de transferencia de energía.

Los controladores FACTS se clasifican en general en dos tipos:

- Controladores de serie
- Controladores de derivación

Controladores serie:

Inyectar tensión en serie con la línea de transmisión.

Controladores de derivación:

Inyectan corriente en la línea de transmisión.

### **STATCOM (Compensador sincrónico estático):**

Según la IEEE, define al STATCOM como un generador estático síncrono operado como un compensador estático de VAR's, en conexión paralelo, en el cual la corriente de salida ya sea capacitiva o inductiva, puede ser controlada de forma independiente del voltaje del sistema. [7,13], también se identifica al STATCOM por las siglas SSC (Static Synchronous Compensator), y se aplica principalmente en líneas de transmisión extensas y es útil para muchos propósitos, como:

- Corrección del factor de potencia.
- Soporte y control de tensión.
- Supresión armónica

Estructura del STATCOM:

Básicamente, el sistema de STATCOM está compuesto de

- Convertidores de potencia.
- Juego de acoplamiento de reactores o un transformador.
- Controlador



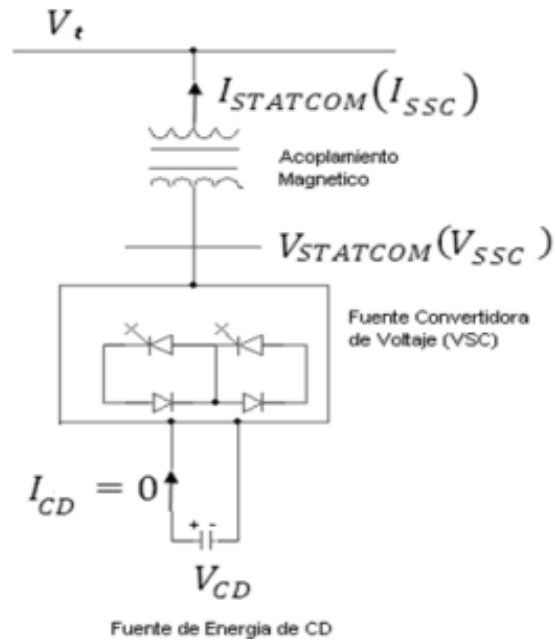


Figura 14. Estructura de Statcom

Fuente: Elaboración propia

#### Ventajas de STATCOM

- Los componentes utilizados en el STATCOM son mucho más pequeños que los de la SVC o VSC.
- Las características de STATCOM son superiores.
- La tensión de salida de STATCOM es casi igual a la entrada de voltaje DC.
- Tiene mejor respuesta transitoria.
- Reducción de armónicos a nivel mínimo.
- Reducción del tamaño del reactor de núcleo de aire, de alto valor.
- Reducción de volumen de los equipos.

#### Funcionamiento de Statcom

- Principio: Dos fuentes de corriente alterna de la misma frecuencia. Cuando se conecta a través de una inductancia en serie, la potencia reactiva fluye desde una tensión más alta a menor magnitud de voltaje
- Cuando cambia el ángulo de voltaje fluye potencia real.
- Cuando la magnitud del voltaje cambia, Reactivo Flujos de poder.
- Esquemas de control para el STATCOM:

- ✓ Esquema de control directo.
- ✓ Esquema de control indirecto.

#### Fundamento ontológico (universo del ser)

Los compensadores estáticos son equipos de corriente alterna que tienen incorporados controladores basados en electrónica de potencia, para mejorar su operación, tal es el caso del D-STATCOM SPWM, un compensador estático basado en un inversor que provee energía almacenada en un condensador para incorporarla a la red eléctrica de forma controlada.

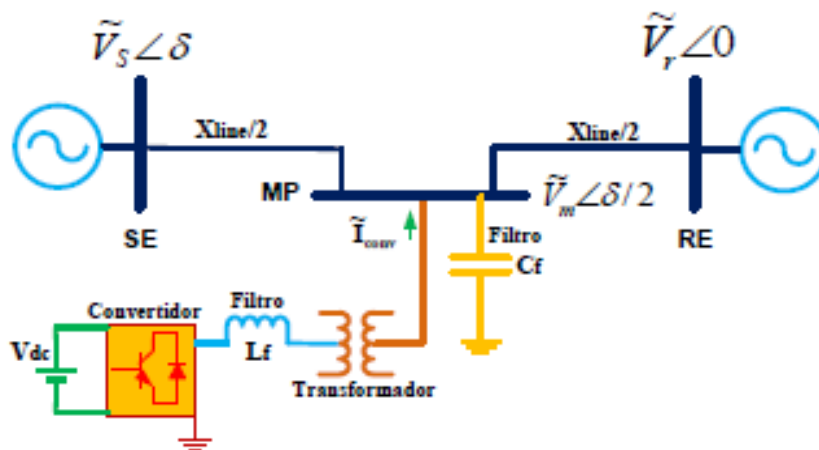
Un equipo de compensación estática o Sistema flexible de transmisión de corriente alterna FACTS es definido por el IEEE Working group como “Un equipo utilizado para la transmisión de corriente alterna incorporando elementos de la electrónica de potencia para permitir el incremento de la capacidad de transmisión de potencia”. La importancia de la electrónica de potencia y otros controladores estáticos es que tienen una gran velocidad de respuesta lo que no limita el número de operaciones. Así como los transistores dan origen a una amplia variedad de procesadores, en el caso de los dispositivos de potencia como Tiristores, GTO e IGBT dan origen a variados controladores FACTS como por ejemplo los convertidores HVDC. Estos controladores pueden realizar, en forma dinámica, el control de la impedancia de línea, voltaje de línea y flujo de potencia activa y reactiva. También pueden absorber o entregar potencia reactiva y en el caso de contar con algún medio de almacenamiento, pueden absorber o entregar potencia activa.

Los avances en materia de compensación dinámica, indican la necesidad de implantar soluciones con inversores por modulación de ancho de pulso senoidal, que permita la obtención de forma de onda menos distorsionada lo más parecido a una senoide y la posibilidad de conexión de los semiconductores de potencia, directamente a la red eléctrica, obviando de esta manera el transformador tradicionalmente utilizado.

Fundamento epistemológico (universo del conocer)

Después de la aparición de los convertidores electrónicos de potencia basados en GTO's, es posible generar o absorber potencia reactiva sin el uso del banco de condensadores o inductores, esto condujo al desarrollo y la aplicación de la nueva generación de dispositivos FACTS. El compensador estático de reactivos (SVC) se ha utilizado ampliamente para la regulación del voltaje en sistema de potencia, mediante el control de la inyección de potencia reactiva.

En su forma más general, el STATCOM puede ser modelado como una fuente de voltaje regulada  $V_s$  conectada a una barra de voltaje  $V_o$  a través de un transformador como puede apreciarse en la *Figura 15*.



*Figura 15.* Representación simplificada de un Statcom

Fuente: Elaboración propia

Utilizando las ecuaciones clásicas que describen el flujo de potencia activa y reactiva en una línea corta en términos de los voltajes  $V_o$  y  $V_s$ , la impedancia del transformador (que puede asumirse ideal) y la diferencia angular entre ambas barras ( $\delta$ ), podemos definir  $P_{STATCOM}$  y  $Q_{STATCOM}$

Un equipo de compensación estática o Sistema flexible de transmisión de corriente alterna FACTS es definido por el IEEE Working group, como un equipo utilizado para la transmisión de corriente alterna incorporando elementos de la electrónica de potencia para permitir el incremento de la capacidad de transmisión de potencia". La importancia de la electrónica de potencia y otros controladores estáticos es que tienen una gran velocidad de

respuesta lo que no limita el número de operaciones. Así como los transistores dan origen a una amplia variedad de procesadores, en el caso de los dispositivos de potencia como Tiristores, GTO e IGBT dan origen a variados controladores FACTS como por ejemplo los convertidores HVDC. Estos controladores pueden realizar, en forma dinámica, el control de la impedancia de línea, voltaje de línea y flujo de potencia activa y reactiva. También pueden absorber o entregar potencia reactiva y en el caso de contar con algún medio de almacenamiento, pueden absorber o entregar potencia activa.

Los componentes básicos de un STATCOM, tiene como parte fundamental un inversor DC-AC, en el cual en lado DC aplicado a este proyecto es de un banco de baterías. El lado AC del inversor es conectado a la red por medio de una reactancia de acoplamiento o filtro inductivo, un transformador elevador de acoplamiento y un filtro capacitivo.

En el presente trabajo se hizo la modelación y la simulación de un compensador estático para mitigar los efectos del bajo factor de potencia en un sistema eléctrico trifásico con carga RL, esta función lo realizó el compensador estático de Distribución (D-STATCOM SPWM). Este compensador genera e inyecta potencia reactiva o puede absorberla si es necesario. El componente importante es el convertidor estático de potencia (inversor), operando como fuente de voltaje regulada (VSI o VSC por sus siglas en inglés), que no posee inercia, esto trae como consecuencia muy bajos tiempos de respuesta ante los cambios en el ajuste de los mismos, dependiendo del tipo de perturbación y del sistema eléctrico (número de fases) a compensar, es la topología del inversor (selección del modo de operación y de conexión).

El intercambio de potencia reactiva entre el compensador y el sistema de AC se logra variando la amplitud del voltaje del compensador. Si la amplitud del voltaje del compensador es superior al voltaje del modo AC, entonces la corriente fluirá del compensador al sistema de potencia.

En este caso el compensador se comporta como un condensador inyectando potencia reactiva al sistema de potencia. Si la amplitud del voltaje del modo de AC es mayor al voltaje del compensador entonces la corriente fluirá del sistema de potencia de compensador, comportándose, así como un inductor, esto es

consumiendo reactivos. Si los niveles de voltaje son iguales entre sí, entonces no existe intercambio de potencia reactiva.

La técnica que se utiliza en el inversor o convertidor es SPWM. Esta técnica se selecciona debido a sus ventajas comparativas de control respecto a las convencionales y porque cada vez es más factible, desde el punto de vista técnico un nivel tolerable de pérdidas al manejar grandes bloques de potencia a frecuencias elevadas de conmutación.

Fundamento metodológico (universo del hacer)

El primer paso fue tener un contacto más detallado con los compensadores estático de potencia reactiva.

El propósito de este trabajo es modelar y simular en un software dedicado, el comportamiento del compensador estático de potencia reactiva, ante variaciones balanceadas de carga. El control implementado en el modelo a desarrollarse está basado en la Teoría de Control DQ y en técnicas de modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM). Esta técnica se selecciona debido a sus ventajas comparativas de control respecto a las convencionales y es más factible desde el punto de vista técnico y económico conseguir semiconductores, que tienen un nivel tolerable de pérdidas al manejar grandes bloques de potencia a frecuencias elevadas de conmutación.

## 2.3 Conceptual

### 2.3.1 MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory), es un programa orientado al cálculo con matrices, al que se reducen muchos de los algoritmos que resuelven problemas de matemática aplicada e Ingeniería. MATLAB integra el cálculo, la visualización y la programación en un ambiente fácil de utilizar, donde los problemas y las soluciones se expresan en una notación matemática. Además, ofrece un entorno interactivo sencillo mediante una ventana en la que podemos introducir ordenes en modo texto y en la que aparecen los resultados. Los gráficos se muestran en ventanas independientes.

MATLAB es un sistema interactivo cuyo elemento básico de datos es el arreglo que no requiere de dimensionamiento previo. Esto permite resolver muchos problemas computacionales, específicamente aquellos que involucren vectores y matrices, en un tiempo mucho menor al requerido, para escribir un programa en un lenguaje escalar no interactivo tal como C o Fortran. MATLAB se utiliza ampliamente en:

- Cálculos numéricos
- Desarrollo de algoritmos
- Modelado, simulación y prueba de prototipos
- Análisis de datos, exploración y visualización
- Graficación de datos con fines científicos o de ingeniería
- Desarrollo de aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario (*GUI, Graphical User Interface*).

### **Componentes de MATLAB**

Consta de cinco partes fundamentales:

#### 1. Entorno de desarrollo

Se trata de un conjunto de utilidades que permiten el uso de funciones Matlab y ficheros en general. Muchas de estas utilidades son interfaces graficas de usuario. Incluye el espacio de trabajo Matlab y la ventana de comandos.

#### 2. La librería de funciones matemáticas Matlab

Se trata de un amplio conjunto de algoritmos de cálculo, comprendiendo las funciones más elementales como la suma, senos y cosenos o la aritmética compleja, hasta funciones más sofisticadas como la inversión de matrices, el cálculo de auto valores, funciones de Bessel y transformadas rápidas de Fourier.

#### 3. Gráficos

Matlab dispone de un conjunto de utilidades destinadas a visualizar vectores y matrices en forma de gráficos. Existe una gran cantidad de posibilidades para ajustar el aspecto de los gráficos, destacando la visualización tridimensional

con opciones de iluminación y sombreado, y la posibilidad de crear animaciones.

#### 4. El interfaz de aplicación de Matlab (API)

Consiste en una librería que permite escribir programas ejecutables independientes en C y otros lenguajes, accediendo, mediante DLLs, a las utilidades de cálculo matricial de Matlab.

#### 5. Control Systems Toolbox

Es un conjunto de rutinas para MATLAB dedicadas a aplicar las distintas herramientas de la teoría de control clásico para sistemas lineales. Podemos dividir este toolbox en cuatro subgrupos:

- Funciones para definir modelos.
- Funciones para obtener la respuesta temporal.
- Funciones para obtener la respuesta en frecuencia.
- Funciones para el diseño de controladores

### **System Identification Toolbox de MATLAB**

Este toolbox con el que cuenta MATLAB y que está dentro de “control system toolbox” construye modelos matemáticos de sistemas dinámicos basándose en los datos medidos de la entrada y salida, provee funciones, aplicaciones de identificación del sistema y bloques de Simulink para poder trabajar con el modelo. Se pueden usar tanto datos de entrada y salida en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia para identificar las funciones de transferencia, los modelos del proceso o el espacio de estados tanto en tiempo continuo como tiempo discreto.

### **Simulink**

Simulink es una aplicación que permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo. Simulink dispone de una serie de utilidades que

facilitan la visualización, análisis y guardado de los resultados de simulación. Simulink se emplea profusamente en ingeniería de control.

### 2.3.2 Modelo matemático del DSTATCOM trifásico

El circuito equivalente de un DSTATCOM trifásico con fuente de tensión se muestra en la figura:

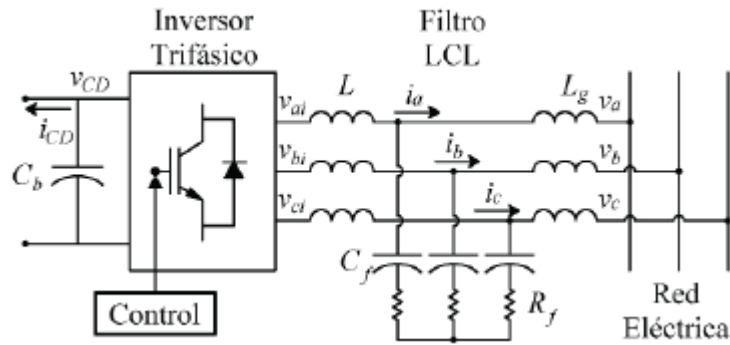


Figura 16. Circuito equivalente del DStatcom  
Fuente: Elaboración propia

Del circuito equivalente presentado en la figura anterior, se deriva el modelo matemático del D-STATCOM, de los principios de electrónica de potencia, se tiene:

$$i_p = \begin{bmatrix} D_{ap} & - & D_{bp} \\ D_{bp} & - & D_{cp} \\ D_{cp} & - & D_{ap} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

$D_{kp}$ , son funciones de conmutación y

$k = a, b, c$

Además:

$$\begin{bmatrix} V_a & - & V_b \\ V_b & - & V_c \\ V_c & - & V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{ap} & - & D_{bp} \\ D_{bp} & - & D_{cp} \\ D_{cp} & - & D_{ap} \end{bmatrix} V_{pn} \quad (2)$$

Al resolver para cada una de las ramas, se obtiene:



$$\begin{aligned}
Ri_a + L \frac{di_a}{dt} &= e_a - V_a \\
Ri_b + L \frac{di_b}{dt} &= e_b - V_b \\
Ri_c + L \frac{di_c}{dt} &= e_c - V_c
\end{aligned} \tag{3}$$

Considerando que:

$$L \frac{di_{ab}}{dt} = \frac{1}{3} L \left( \frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) \tag{4}$$

Si se reemplaza esta ecuación en la anterior, tenemos:

$$\begin{aligned}
L \frac{di_{ab}}{dt} &= \frac{1}{3} [(e_a - e_b) - (V_a - V_b)] - i_{ab} R \\
L \frac{di_{bc}}{dt} &= \frac{1}{3} [(e_b - e_c) - (V_b - V_c)] - i_{bc} R \\
L \frac{di_{ca}}{dt} &= \frac{1}{3} [(e_c - e_a) - (V_c - V_a)] - i_{ca} R
\end{aligned} \tag{5}$$

Al aplicar la ecuación (2) en la ecuación (5), y llevarla a la matriz, se llega a:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} &= \\
\frac{1}{3L} \begin{bmatrix} e_a & - & e_b \\ e_b & - & e_c \\ e_c & - & e_a \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} D_{ap} & - & D_{bp} \\ D_{bp} & - & D_{cp} \\ D_{cp} & - & D_{ap} \end{bmatrix} V_{pn} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{6}$$

y

$$C \frac{dV_{pn}}{dt} = i_p = \begin{bmatrix} D_{ap} & - & D_{bp} \\ D_{bp} & - & D_{cp} \\ D_{cp} & - & D_{ap} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \tag{7}$$

El modelo matemático representado por la serie de la ecuación (1) a la ecuación (7) corresponde a un sistema trifásico. Este modelo se simplifica utilizando la transformación de Park (convierte un sistema trifásico en componentes ortogonales e invariantes en el tiempo), considerando una referencia rotativa a una velocidad angular  $w$ , se tiene:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

y

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(wt) & \cos\left(wt - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(wt + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin(wt) & -\sin\left[w t - \frac{2}{3}\pi\right] & -\sin\left[w t - \frac{2}{3}\pi\right] \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde:

$i_d$ : componente de la corriente activa

$i_q$ : componente de la corriente reactiva

Al usar la inversa de la transformación de Park, tenemos:

$$\begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_a & - & i_b \\ i_b & - & i_c \\ i_c & - & i_a \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde:

$$T^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -\sin\left(wt - \frac{1}{3}\pi\right) & \cos\left(wt - \frac{1}{3}\pi\right) & 1 \\ \sin(wt) & -\cos(wt) & 1 \\ -\sin\left(wt + \frac{1}{3}\pi\right) & \cos\left(wt + \frac{1}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Finalmente, la corriente en el eje directo y en cuadratura será:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Similarmente, para las tensiones y las funciones de conmutación (D), tenemos:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{ca} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} D_{ab} \\ D_{bc} \\ D_{ca} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Al aplicar la ecuación (13) y (14) a la ecuación (6):

$$\frac{dT^{-1}}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + T^{-1} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} T^{-1} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} T^{-1} \begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix} V_{pm} - \frac{R}{L} T^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

Si tomamos los principios de sistemas de potencia:

$$\begin{aligned} e_d &= V_m \\ e_q &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$T \frac{dT^{-1}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Si se multiplica T a ambos lados de la ecuación (15) y se aplica la ecuación (17) obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w & -\frac{D_d}{3L} \\ -w & -\frac{R}{L} & -\frac{D_q}{3L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{3L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_m \quad (18)$$

Al reajustar la ecuación 18 tenemos:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + i_q w - \frac{V_{dc}}{3L} D_d + \frac{1}{3L} V_m \quad (19)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q + i_d w - \frac{V_{dc}}{3L} D_q \quad (20)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q + i_d w - \frac{V_{dc}}{3L} D_q \quad (21)$$

Finalmente, para representar la dinámica del D-STATCOM, en una representación espacio-estado, se tiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w & -\frac{D_d}{3L} \\ -w & -\frac{R}{L} & -\frac{D_q}{3L} \\ \frac{3}{2C} D_d & \frac{3}{2C} D_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{3L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_m \quad (22)$$

La ecuación (22) completa el modelo dinámico del D-STATCOM. En este se observan los estados de los lazos dinámicos del D-STATCOM:  $i_d$ ,  $i_q$ , y  $V_{dc}$ . El valor  $V_m$  puede ser considerado como parámetro del sistema. Las variables de control son  $D_d$ ,  $D_q$ .

#### 2.4. Definiciones de Términos Básicos

- **FACTS:** (Flexible AC Transmission Systems); Sistemas de Transmisión Flexibles en AC.
- **Modelamiento:** Reproducción ideal y concreta de un objeto de un fenómeno con fines de estudio y experimentación.
- **Simulación:** Es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital.
- **D-STATCOM SPWM:** (Distribution static compensator): Dispositivo convertidor / inversor de estado sólido que se conecta en derivación (paralelo), capaz de generar o absorber de forma controlada tanto potencia reactiva como potencia activa.
- **Factor de potencia:** (PF); Es la relación entre la potencia eléctrica activa(P) y la potencia eléctrica aparente (S) en un circuito de corriente alterna. Este es un indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica
- **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.
- **Métodos:** El método es la manera de alcanzar los objetivos o el procedimiento para ordenar la actividad.
- **SPWM:** (Sinusoidal Pulse Width Modulation). Modulación por ancho de pulso senoidal.

- **IGBT:** (Insulated Gate Bipolar Transistor), Transistor bipolar de puerta aislada.
- **VSC :** (Voltage Source Converter), convertidor de fuente de voltaje
- **HD:** (Harmonic Distorsion), Distorsion Armónica
- **THD:** (Total Harmonic Distorsion). Distorsión armónica total.
- **PERTURBACIÓN:** Es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de salida del sistema. Estas afectan directamente el curso del proceso, pero no pueden ser cambiadas a voluntad.

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis (general e hipótesis específicas)

##### 3.1.1. Hipótesis general

HG: El modelamiento y simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásica, basada en un inversor SPWM, evita el deterioro de la calidad de energía del suministro eléctrico.

##### 3.1.2. Hipótesis específicas

HE<sub>1</sub>: El uso de software especializado, en un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mejora la calidad de energía eléctrica.

HE<sub>2</sub>: El uso del modelo diseñado, genera e inyecta potencia reactiva o absorbe en un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basada en un inversor SPWM.

HE<sub>3</sub>: El diseño de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM es posible la simulación.

HE<sub>4</sub>: El compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, controla la potencia reactiva inyectada o absorbida a la red eléctrica.

#### 3.2 Definición conceptual de variables

Variable X = Compensación reactiva estático electrónico

Variable Y = Estabilidad y calidad del suministro eléctrico

Variable Z= Distorsión armónica total de voltaje (THDV)

##### 3.2.1 Operacionalización de variables

Variables independientes (variables de entrada)

Variable X= Compensación reactiva

Indicadores:

Carga reactiva:  $X_1$

Tensión de la red:  $X_2$

Corriente de consumo (medidor):  $X_3$

Corriente de consumo (de la carga):  $X_4$

Corriente del compensador:  $X_5$

Variables dependientes (variables de salida)

Variable Y= Modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM)

Indicadores:

Índice de Modulación de amplitud del inversor:  $Y_1$

Frecuencia constante del inversor SPWM:  $Y_2$

Señal modulante: onda senoidal:  $Y_3$

Señal portadora: onda triangular:  $Y_4$

Variable Z = Distorsión armónica total de voltaje : ( THD<sub>v</sub>)

Contenido armónico de la Tensión:  $Z_1$

## IV. DISEÑO METODOLÓGICO

### 4.1. Tipo y diseño de investigación

#### Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo descriptivo, el enfoque de esta investigación es cuantitativa, es posible medir sus efectos y probar la hipótesis haciendo uso del análisis causa-efecto, es desarrollada de una manera secuencial y deductiva en orden riguroso.

El diseño de la investigación es no experimental.

#### **Generalidades**

El D-STATCOM SPWM es un compensador estático, son equipos de corriente alterna que tienen incorporados controladores basados en electrónica de potencia (utilizan dispositivos de estado sólido, que los hace más económicos, confiables y de operación rápida), para mejorar su operación, están basados en un inversor que se alimenta de energía almacenada en un condensador, generando corriente alterna, para incorporarla a la red de forma controlada.

Permite corregir el factor de potencia, el cual impacta directamente en la factura del servicio de energía eléctrica, cuanto menor sea el factor de potencia mayor es el pago a la compañía del suministro eléctrico y viceversa. La evaluación consistirá en establecer el límite hasta cual es posible corregir el factor de potencia en sistemas trifásicos desbalanceados.

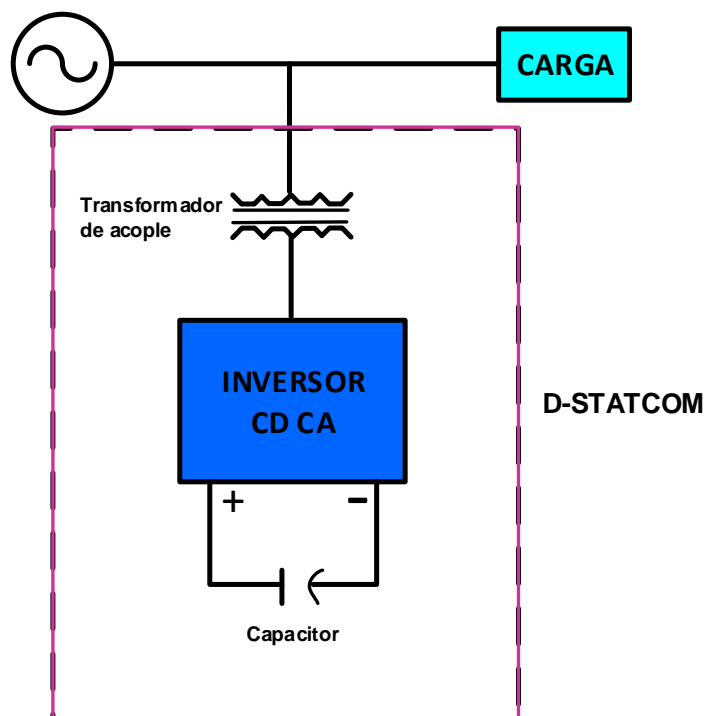
El factor de potencia (PF), es la relación entre la potencia eléctrica activa (P) y la potencia eléctrica aparente (S) en un circuito de corriente alterna, este es un indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica. El bajo factor de potencia o coseno  $\phi$ , es generado por las cargas reactivas que producen los artefactos eléctricos que usan reactancias, transformadores o bobinados. Esta corriente parasita vuelve a ingresar a la red eléctrica creando una serie de inconvenientes como recalentamiento de conductores, aumento del consumo y desfasaje en los ciclos (Hz). Este inconveniente es multado por la empresa de distribución eléctrica por lo que debe corregirse.

El factor de potencia menor a la unidad es debido a que hay equipos que consumen energía reactiva. Esto provoca el incremento en la corriente eléctrica



que circula en la instalación eléctrica del consumidor y en los conductores de la compañía suministradora, cuando disminuye en exceso, las corrientes generadas pueden provocar daño en las instalaciones por efecto de sobrecarga y alteraciones en la regulación de tensión, lo cual afecta al rendimiento y funcionamiento de los equipos conectados.

En la *Figura 17* se puede observar un diagrama de bloques de un D-STATCOM SPWM y PCC ( punto de acoplamiento a una red de distribución).



*Figura 17. Diagrama de bloques de un D-Statcom SPWM y PCC*

*Fuente: Elaboración propia*

Un compensador estático síncrono de distribución o D-Statcom es un dispositivo convertidor/inversor de estado sólido que se conecta en derivación (paralelo), capaz de generar o absorber de forma controlada tanto potencia reactiva como potencia activa, está basado en la topología llamada fuente convertidora de voltaje (VSC). [4]

En la *Figura 18*, las variables que se requieren para el análisis del modo de operación del compensador son: el ángulo de fase del voltaje de la red de

distribución y del convertidor;  $\angle\theta$  y  $\angle\phi$  respectivamente; y las magnitudes del voltaje de la red de distribución ( $V_1$ ) y el voltaje de salida del convertidor ( $V_2$ ).

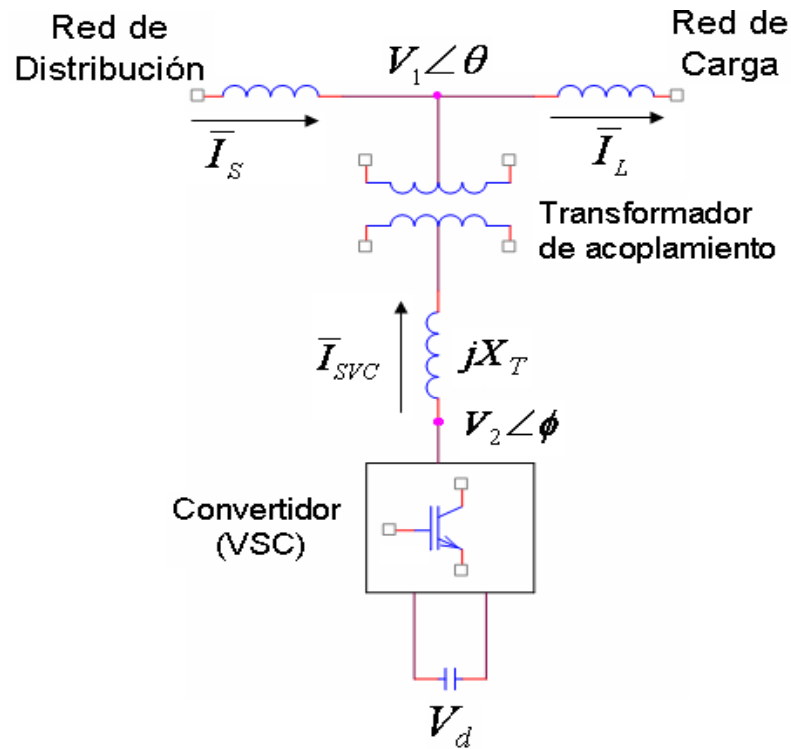


Figura 18. Variables para modo de operación del D-Statcom SPWM.

Fuente: Elaboración propia

El flujo de potencia activa y reactiva es bidireccional dependiendo del modo de operación del compensador. Para efectos de la corrección del factor de potencia, el compensador provee de potencia reactiva a la red de distribución. La inyección de potencia reactiva está sujeta a condiciones de las variables descritas en la Figura 18.

Para que el intercambio de potencia sea sólo reactiva, la fase del voltaje de salida de la red de distribución, debe ser igual a la fase del voltaje de salida del compensador. Es decir  $\angle\theta$  y  $\angle\phi$ . Por otro lado, las variables que implican las magnitudes de los voltajes de la red de distribución y de la salida del convertidor,  $V_1$  y  $V_2$  respectivamente son de vital importancia para definir la

dirección del flujo de reactivos. La *Figura 19* resume los modos de operación del D-STATCOM SPWM.

### Funcionamiento

$\angle \theta = \angle \phi$  Sólo intercambia potencia reactiva

$|V_1| > |V_2|$  Absorbe potencia reactiva (inductivo)

$|V_2| > |V_1|$  Genera potencia reactiva (capacitivo)

$\angle \theta < \angle \phi$  Absorbe potencia activa (eleva  $V_1$ )

$\angle \theta > \angle \phi$  Inyecta potencia activa (reduce  $V_1$ )

*Figura 19. Modos de operación del D-Statcom SPWM*

*Fuente: Elaboración propia*

Cuando el D-STATCOM SPWM genera potencia reactiva, se dice que está en Modo Capacitivo y entonces inyecta reactivos al sistema de distribución y cuando el D-STATCOM SPWM absorbe potencia reactiva, este está en Modo Inductivo, y entonces se comporta como un elemento consumidor de reactivos, siendo el sistema de distribución el encargado de suministrarlos. Se dice que en el modo inductivo el D-STATCOM SPWM es una carga adicional al sistema mientras que, en el modo capacitivo, éste actúa como una fuente intercalada de voltaje al sistema. [5]. En la *Figura 20* se observa el circuito equivalente del compensador y el sistema en ambos modos: modo capacitivo y modo inductivo.

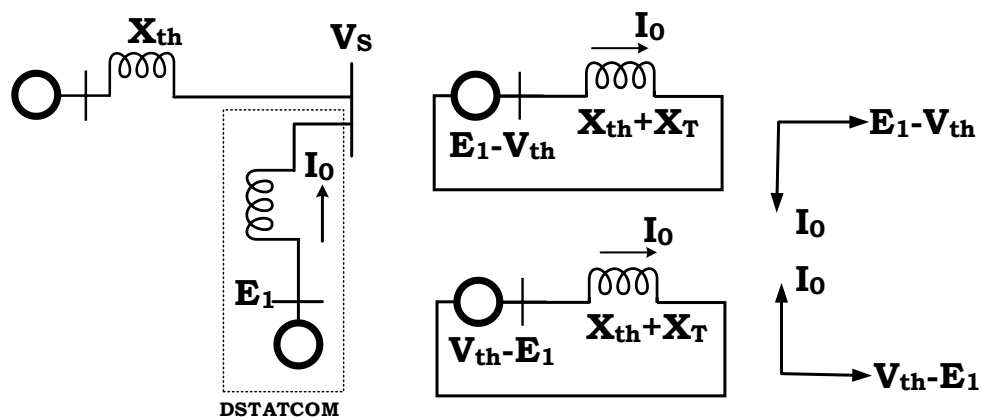


Figura 20. D-Statcom SPWM operando en modo capacitivo e inductivo.

Fuente: Elaboración propia

## DATOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO DEL COMPENSADOR

Se diseña el compensador para que sea el adecuado para su propósito y adicionalmente sea económicamente ventajoso, en su diseño es necesario tener en cuenta lo siguiente:

1. Diagrama unifilar del sistema al cual el compensador será conectado.
2. Tensión y Frecuencia nominales.
3. Información sobre la variación de la potencia reactiva y/o la carga relevante.
4. Variación de Tensión e Intensidad de Corriente
5. Contenido Armónico
6. Potencia Reactiva requerida y posible velocidad de control
7. Conexión de Transformadores
8. Condiciones Ambientales

## EL D-STATCOM SPWM COMO COMPENSADOR

La Figura 21 es el diagrama de bloques de los componentes principales de un sistema para la corrección del factor de potencia (PFC).

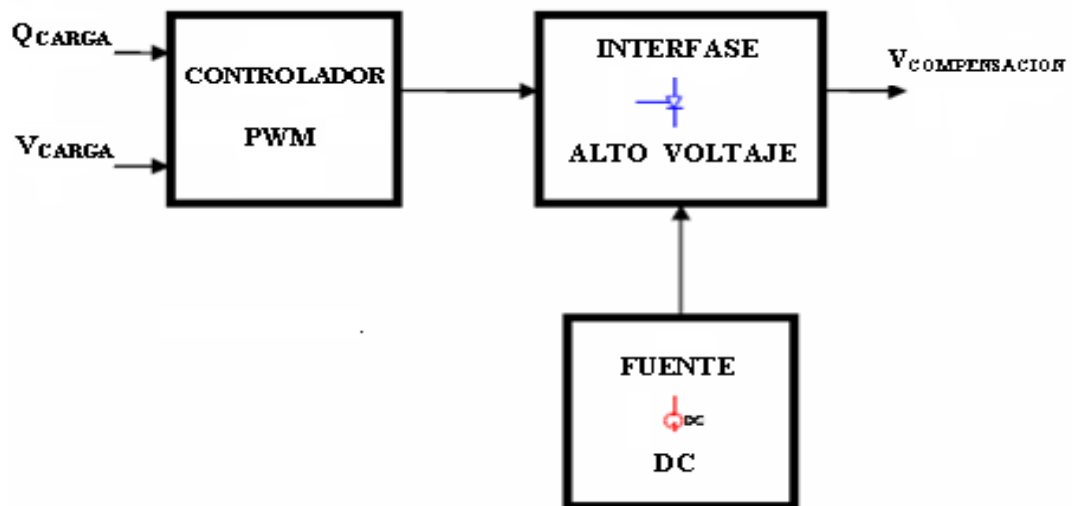


Figura 21. Diagrama de bloques de un corrector de factor de potencia

Fuente: Elaboración propia

Los tres bloques representan: el controlador PWM, la Interfase de Alto Voltaje y la Fuente D.C.

La estructura interna del D-STATCOM SPWM se compone de cinco elementos básicos (Ver Figura 22). El principal es el inversor, luego se observa el enlace de corriente entre el inversor y el PCC. El elemento almacenador de energía, los dispositivos de acondicionamiento de las señales de potencia y el controlador.

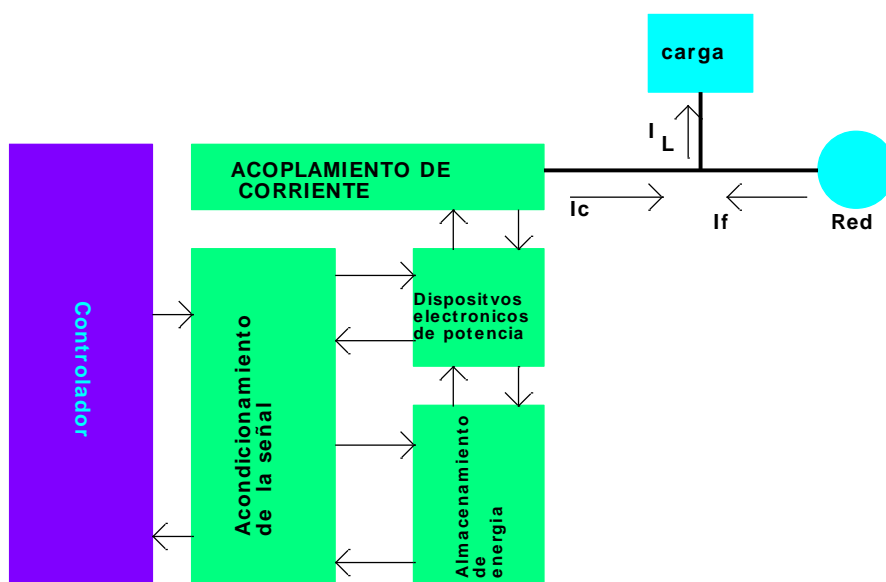


Figura 22. Estructura básica de un D-Statcom SPWM

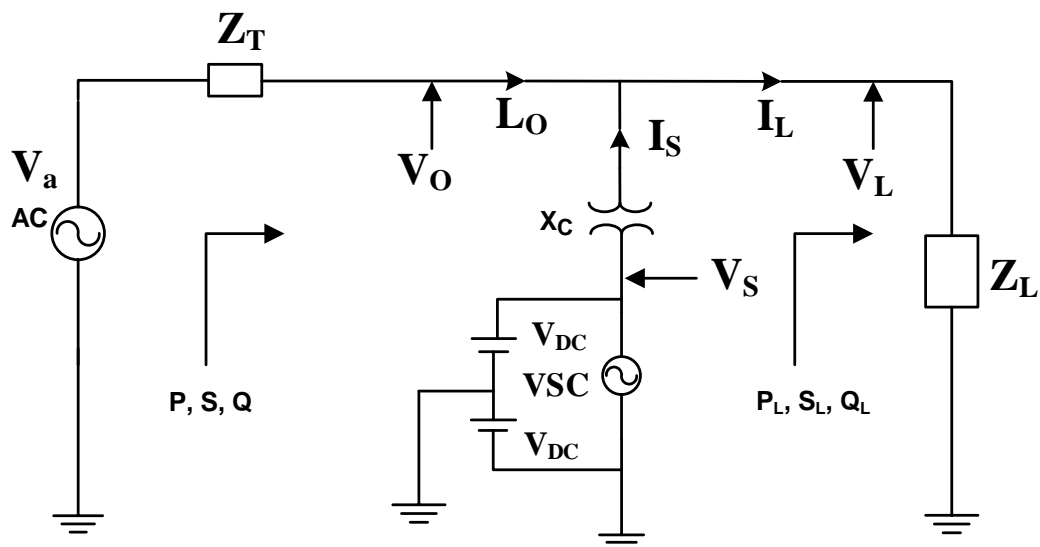
Fuente: Elaboración propia

El inversor está conformado por dispositivos electrónicos de potencia, IGBT (IRAMY 20UP60B). El enlace de corriente es una inductancia que facilita la transferencia de energía entre la red (sistema de distribución) y el inversor de potencia. El controlador garantiza pródidamente la ejecución de los procesos de compensación de las corrientes reactivas y de la corrección del factor de potencia. El bloque de acondicionamiento de señales permite transformar los valores instantáneos de tensión y corriente del inversor de potencia a niveles capaces de ser manejados por el controlador.

La etapa de potencia del compensador está representada por el almacenador de energía. Está constituido en su forma más simple por un banco de baterías.

#### A. Análisis de fuerza del compensador

Para la etapa de fuerza, el diseño se inicia con un diagrama unifilar base para el análisis del sistema y su compensador. La *Figura 23* muestra un diagrama unifilar y las respectivas variables del sistema y compensador.

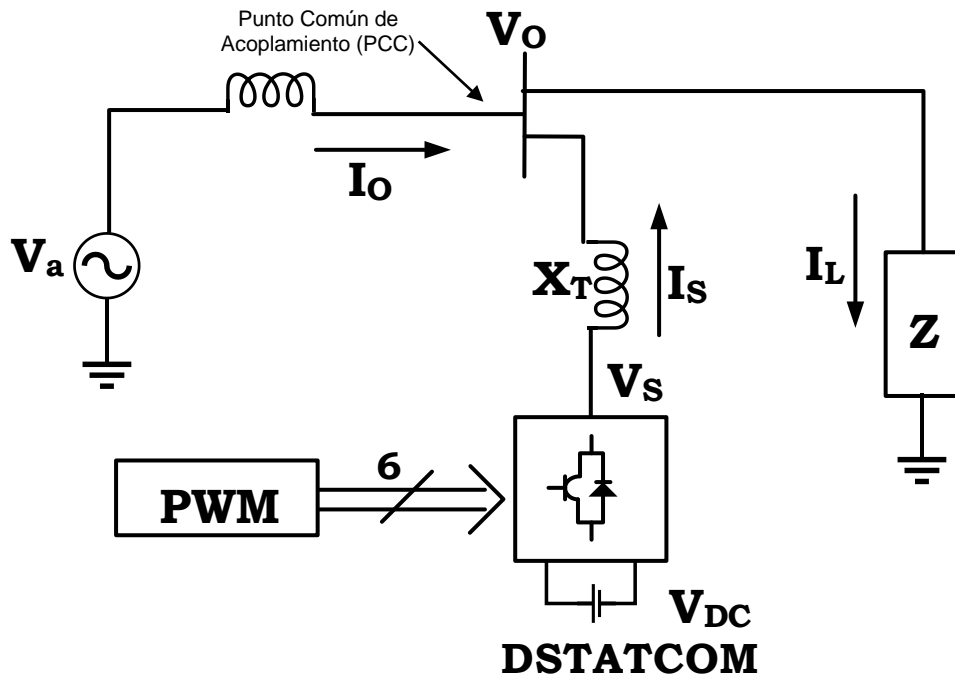


*Figura 23.* Diagrama unifilar de un D-Statcom SPWM corrector de factor de potencia

Fuente: Elaboración propia

El diseño del compensador puede resumirse a cuatro datos principales tales como: Potencia, Intensidad de corriente eléctrica, Tensión/Frecuencia y Conexión de Transformadores.

El dimensionamiento del D-STATCOM SPWM emplea como referencia los parámetros anteriores. Comenzando con un diseño sencillo, un diagrama unifilar básico simplificado de conexión al sistema, se puede describir en la *Figura 24*, con fines de análisis del dimensionamiento.



*Figura 24.* Diagrama unifilar básico para el diseño de un D-Statcom SPWM  
Fuente: Elaboración propia

### Potencia

Para implementar la generación de potencia reactiva, el criterio de funcionamiento del D-STATCOM SPWM nos clasifica en el modo, en donde el voltaje de salida del inversor es mayor en magnitud, al voltaje de la fuente alterna principal del sistema. Estando ambos voltajes en fase, de las expresiones para la potencia activa y reactiva para el D-STATCOM SPWM [1], se tienen:

$$P_{\text{DSTATCOM}} = \frac{|V_o| \cdot |V_s|}{X_T} \cdot \sin(\delta) \quad (1)$$

$$Q_{\text{DSTATCOM}} = \frac{|V_o| \cdot |V_s|}{X_T} \cdot \text{Cos}(\delta) - \frac{|V_s|^2}{X_T} \quad (2)$$

Siendo el desfase ( $\delta=0$ ), luego se tiene:

$$P_{\text{DSTATCOM}} = \frac{|V_o| \cdot |V_s|}{X_T} \cdot \text{Sin}(0) = 0$$

$$P_{\text{DSTATCOM}} = 0 \text{ [W]} \quad (3)$$

Con el mismo criterio ( $\delta=0$ ), se tiene:

$$Q_{\text{DSTATCOM}} = \frac{|V_o| \cdot |V_s|}{X_T} \cdot \text{Cos}(0) - \frac{|V_s|^2}{X_T} = \frac{|V_o| \cdot |V_s|}{X_T} - \frac{|V_s|^2}{X_T}$$

$$Q_{\text{DSTATCOM}} = \frac{|V_o| \cdot |V_s|}{X_T} \text{ [VAR]} \quad (4)$$

Considerando que para condiciones ideales de factor de potencia igual a 1, la inyección de potencia reactiva del convertidor sólo depende de la magnitud de su voltaje de salida ( $V_s$ ). Dado que el índice de modulación  $m$ , incide en  $V_s$  es posible también expresar dicha potencia en términos de tal índice. La ecuación (4) será el fundamento de control, para la inyección de potencia reactiva del D-STATCOM SPWM.

#### *Intensidad de Corriente Eléctrica*

La intensidad de corriente eléctrica del sistema queda definida por las componentes fasoriales de la corriente del inversor ( $I_s$ ) y la corriente de la carga ( $I_L$ ), dando origen a la corriente fasorial de la fuente alterna de suministro eléctrico ( $I_o$ ).

$$\vec{I}_o = \vec{I}_s + \vec{I}_L$$



Reescribiendo la ecuación anterior, expresando la corriente de la carga en sus componentes activa ( $I_{LP}$ ) y reactiva ( $I_{LQ}$ ), se tiene:

$$\vec{I}_O = \vec{I}_S + \vec{I}_L = \vec{I}_S + (\vec{I}_{LP} + \vec{I}_{LQ}) \quad (5)$$

Vemos en la ecuación 5, para la fuente alterna de suministro principal, provea únicamente corriente activa a la carga, la componente fasorial de corriente de salida o de compensación del convertidor ( $I_S$ ) debe estar regida por la expresión:

$$\vec{I}_S = -j \vec{I}_{LQ} [A] \quad (6)$$

Tal que  $\vec{I}_O = \vec{I}_{LP}$ , es decir, la componente activa de la carga es suministrada únicamente por la fuente de suministro principal.

Otra forma de simplificar el análisis de la corriente de compensación, es a través de la impedancia de las inductancias de rizado en la salida del convertidor ( $X_T$ ) y de la diferencia de voltajes entre  $V_S$  y  $V_O$  en el PCC. La expresión queda:

$$\vec{I} = \frac{\Delta V}{jX_T} = -j \frac{\Delta V}{X_T} = -\frac{V_S - V_O}{X_T} \quad (7)$$

Donde la magnitud de la corriente del compensador viene resumida por la ecuación:

$$|\vec{I}_S| = \frac{|V_S - V_O|}{X_T} [A] \quad (8)$$

Es preciso recordar el cumplimiento de la norma IEEE 519- 1992, que manifiesta que el valor porcentual de la Distorsión Armónica Total de Corriente (THDi), debe ser inferior al 30% de la corriente nominal fundamental.

Tensión y frecuencia.

La tensión y frecuencia nominales de operación de la fuente alterna principal de suministro vienen dadas por la empresa eléctrica que brinda el servicio y el sistema y/o el sistema de distribución al cual se conecte el D-STATCOM SPWM. La tensión o voltaje de salida del inversor ( $V_s$ ) depende del índice de modulación. El inversor actúa como una fuente regulada de voltaje que se expresa como un porcentaje del valor de una fuente fija o continua ( $V_{DC}$ ); etapa de almacenamiento de energía del inversor, representada por un banco de capacitores o de baterías.

Expresando el voltaje de línea-neutro de salida  $V_s$ , como un porcentaje de la fuente fija, en términos del índice de modulación ( $m$ ):

$$V_{S_{L-N}} = m \frac{V_{DC}}{2} [A] \quad < \quad (9)$$

Donde el voltaje línea-línea ( $V_{LL}$ ) de salida del inversor se expresa como:

$$V_{S_{L-L}} = \sqrt{3}m \frac{V_{DC}}{2} [V] \quad (10)$$

Para efectos de la modulación sinusoidal es aplicable el 50% del valor de la fuente fija,  $V_{DC}/2$ . La frecuencia de la tensión de salida del inversor viene dada por la misma frecuencia de generación e igual a 60 Hz.

Observando las ecuaciones para la potencia activa y reactiva, (1) y (2), se evidencia que ambas dependen de la magnitud de la variación de voltajes ( $\Delta V$ ) entre el inversor ( $V_s$ ) y el punto común de acoplamiento (PCC) ( $V_o$ ).

$$\Delta V = |V_o - V_s|$$

Dado que la forma de onda senoide de voltaje en el Punto Común de Acoplamiento (PCC) es constante y periódica en el tiempo, la variación depende del voltaje  $V_s$  del inversor y se expresa:

$$\Delta V = |V_o - V_s| = \left| V_o - m \frac{V_{DC}}{2} \right| [V] \quad (11)$$

Para efectos del cumplimiento de la norma IEEE 519-1992 la variación de tensión permitida en  $V_s$ ; para tensiones inferiores a los 69 kV, será del 3% del voltaje nominal por consumidor. La distorsión armónica de tensión según la norma anteriormente mencionada establece un valor del 5% de la fundamental del voltaje nominal.

### Modulación SPWM

Conocida también como modulación con portadora triangular, este tipo de modulación compara la señal de error o moduladora con una señal triangular o en dientes de sierra de alta frecuencia llamada portadora. El resultado es una señal de salida de frecuencia constante con un ciclo de trabajo variable.

Se definen dos coeficientes o índices de modulación:

El coeficiente de índice de modulación en amplitud  $m_a = V_m/V_c$

y el coeficiente de modulación de frecuencia  $m_f = f_c/f_a$

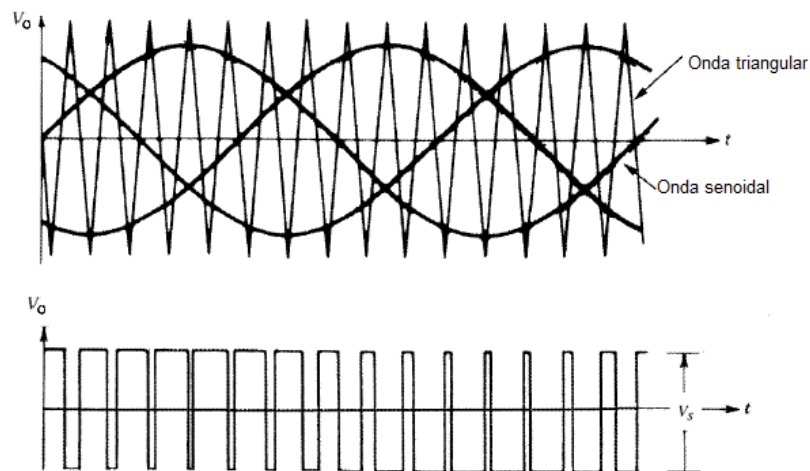


Figura 25. Formas de onda de la señal moduladora, la señal portadora y la señal de salida.

Fuente: Elaboración propia

El resultado de la comparación para un  $m_f$  pequeño y modulación por ancho de pulso lineal  $m_a \leq 1$ .

La frecuencia de  $f_s = 10$  Khz. es la adecuada.

El ciclo de trabajo de cada una de las ramas del circuito de potencia del circuito inversor, en cada periodo de conmutación queda establecido por la relación entre el valor instantáneo de la señal moduladora y la amplitud de la señal portadora, se evita la presencia de subarmónicos de la frecuencia fundamental y/o armónicos pares; en la corriente de inyección usando un valor entero impar para  $m_f$ . Es importante evitar aumentar la amplitud de la señal moduladora  $m_a > 1$ , para que el modulador no opere en la zona de sobremodulación, si fuera así se pierde linealidad entre la frecuencia de la señal moduladora y el índice de modulación  $m_a$ , provocando un incremento en el contenido armónico.

#### Consideraciones acerca del esquema SPWM

Para usar la técnica SPWM es necesario tener en cuenta entre otros, los siguientes aspectos:

- a) Escoger la señal portadora como un múltiplo impar de la frecuencia nominal. En éste caso se eligió como  $f_{\text{CARRIER}} = 81 \times 60 = 4860 \text{ Hz}$ , de esta manera se garantiza la no existencia de armónicos pares [1].
- b) Corroborar que la variación de la amplitud de la señal del voltaje de salida del inversor ( $V_S$ ) con respecto al índice de modulación  $m$  tiene un comportamiento lineal en una vecindad del punto de operación inicial, esto es:

$$V_s = K \cdot V_{dc}$$

#### Teoría de control DQ

Para establecer el control del STATCOM se escogió el esquema desarrollado por Schauder y Mehta [7], el cual está basado en la transformación de Park. La ventaja principal de esta teoría tiene que ver con la posibilidad de desacoplar el control de P y Q del STATCOM, además de transformar ambas señales inherentemente sinusoidales en variables "DC" que pueden ser manejadas por un sistema de control lineal. Para explicar el esquema de control usado en este trabajo se usará como referencia el sistema mostrado en la *Figura 26*.

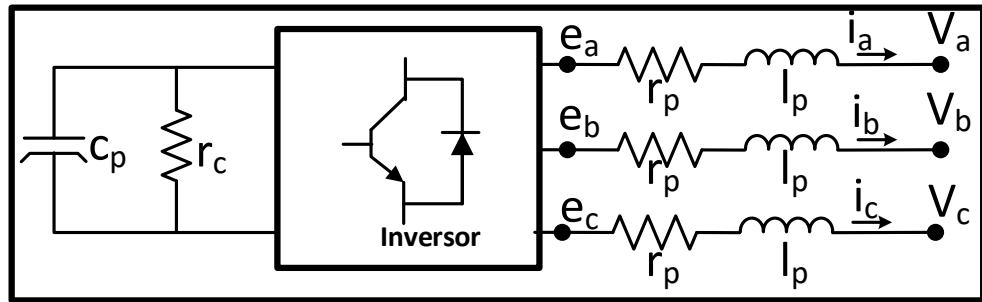


Figura 26. Esquema general del Statcom

Fuente: Elaboración propia

En este sistema  $r_p$  y  $l_p$  representan la resistencia y reactancia del transformador respectivamente,  $r_c$  la resistencia de pérdidas del inversor,  $c_p$  la capacitancia del inversor,  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$  las tensiones alternas a la salida del STATCOM. Por último, las tensiones y corrientes del sistema AC corresponden a  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ,  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ . Todos los valores están expresados en pu. Aplicando la transformación sobre las tensiones y corrientes del sistema AC de la *Figura 26*, y si se asume un sistema balanceado de 3 conductores, se obtienen:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

donde  $[C]$  corresponde a la matriz de transformación Park definida como:

$$[C] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

En este caso  $\theta$  corresponde al ángulo instantáneo del voltaje de la barra ( $V_s$ ) respecto a la referencia sincrónica escogida como el voltaje de la fase A del sistema, y por consiguiente con el voltaje del eje directo ( $|v|$ ). Esta

transformación simplifica notablemente el esquema implementado, pues reduce a tres las variables de control: corriente en eje directo (id), corriente en cuadratura (iq), y el voltaje en el eje directo (|v|). La potencia activa y reactiva transmitidas desde ó hasta el STATCOM se transforman en una función de las constantes id y iq respectivamente, pues se definen como:

$$P = \frac{3}{2}(|v|.id)$$

$$Q = \frac{3}{2}(|v|.iq)$$

Por otro lado, la ecuación de estado del sistema puede ser definida como:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-rp}{lp} & 0 \\ 0 & \frac{-rp}{lp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} + \frac{1}{lp} \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \end{bmatrix}$$

Siendo x1 y x2 unas variables auxiliares de control utilizadas para eliminar la dependencia entre ed e iq y entre eq e id respectivamente. Se definen entonces los siguientes controladores

$$x1 = \left( kp1 + \frac{ki1}{p} \right) (idref - id)$$

$$x2 = \left( kp2 + \frac{ki2}{p} \right) (iqref - iq)$$

Finalmente, las siguientes relaciones expresan la relación entre el voltaje en el capacitor y la tensión de salida del inversor:

$$e_d = k.v_{dc} \cdot \cos(\alpha)$$

$$e_q = k.v_{dc} \cdot \sen(\alpha)$$

donde Vdc es el voltaje en p.u. instantáneo en la barra DC,  $\alpha$  es el ángulo de desfasaje entre el voltaje a la salida AC del inversor (ea) y el voltaje del sistema (Va).

Diseño de investigación  
No experimental

#### 4.2 Método de investigación

El método de investigación es no experimental, tiene como objetivo definir cómo actúa una variable independiente sobre la dependiente, se trata de establecer y analizar las relaciones causales que se producen.

#### 4.3 Población y muestra

Comprende todos los componentes eléctricos y electrónicos del compensador. Para la naturaleza del presente trabajo de investigación, no se utilizaron población y la muestra, coincide con la población.

#### 4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, de la Universidad Nacional del Callao, ubicada en el distrito de Bellavista, Provincia Constitucional del Callao.

El período en que se desarrolló la investigación fue de enero a setiembre 2023.

#### 4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

- a) Técnicas para recolectar información documental, las fichas son instrumentos para recolectar dicha información.
- b) Técnicas para recolección información estadística.
- c) Técnicas para recolectar información empírica:
  - Observación directa.

Las técnicas de recolección, la observación con los cuales se usó el programa, teniendo como instrumento de simulación del proceso con el software dedicado, suponiendo que la planta tiene incertidumbre en los parámetros del sistema, consideremos parámetros nominales.

#### 4.6 Análisis y procesamiento de datos

Se utilizó la teoría de la identificación de sistemas, así como el software utilizando gran cantidad de estratos de la información, basada en procedimientos estadísticos que permite realizar validaciones con patrones ya establecidos, para este trabajo de investigación, de igual manera se utilizó el software Matlab-Simulink.



## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos

Sin Statcom:

Para voltaje de entrada pico de 80 V, carga RL.

Tabla 2. *Resultados del modelo Simulink sin Statcom*

| Valores del load<br>P(W), Q (VAR) | $P_s(W)$ | $Q_s(Var)$ | $P_R(W)$ | $Q_R(Var)$ | $V_{LOAD}(V)$ |
|-----------------------------------|----------|------------|----------|------------|---------------|
| 50, 500                           | 26.86    | 563        | 9.134    | 91.35      | 65            |
| 50, 400                           | 29.65    | 541.2      | 13.21    | 105.7      | 69            |
| 50, 300                           | 35.36    | 508.6      | 20.73    | 124.4      | 72            |
| 50, 200                           | 48.92    | 454.9      | 37.03    | 148.1      | 76            |

Fuente: Elaboración propia

Con Statcom:

Para voltaje de entrada pico de 80 V, carga RL.

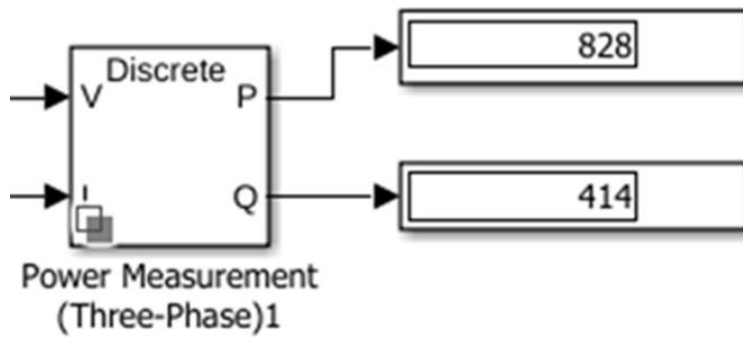
Tabla 3. *Resultados del modelo Simulink con Statcom*

| Valores del load<br>P(W),Q (VAR) | $P_s(W)$ | $Q_s(Var)$ | $P_R(W)$ | $Q_R(Var)$ | $V_{LOAD}(V)$ |
|----------------------------------|----------|------------|----------|------------|---------------|
| 50, 500                          | 27.49    | 612.3      | 8.047    | 80.47      | 80            |
| 50, 400                          | 29.9     | 593.2      | 11.6     | 92.76      | 80            |
| 50, 300                          | 34.78    | 564.6      | 18.22    | 108.7      | 80            |
| 50, 200                          | 46.4     | 517.8      | 32.09    | 128.4      | 80            |

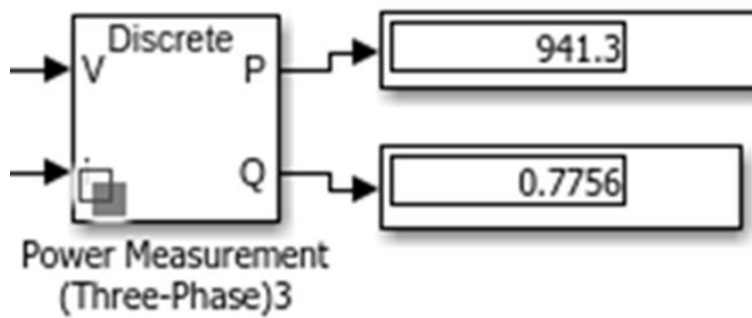
Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Resultados inferenciales

Para la línea de red eléctrica sin STATCOM se observa que hay una potencia de activa de 828  $W$  y Potencia Reactiva aproximadamente de 414 VAR.



Para la línea de red eléctrica con STATCOM se observa que hay una potencia de activa de 941.3  $W$  y Potencia Reactiva aproximadamente de 0.7756 VAR.



## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contratación y demostración de hipótesis con los resultados

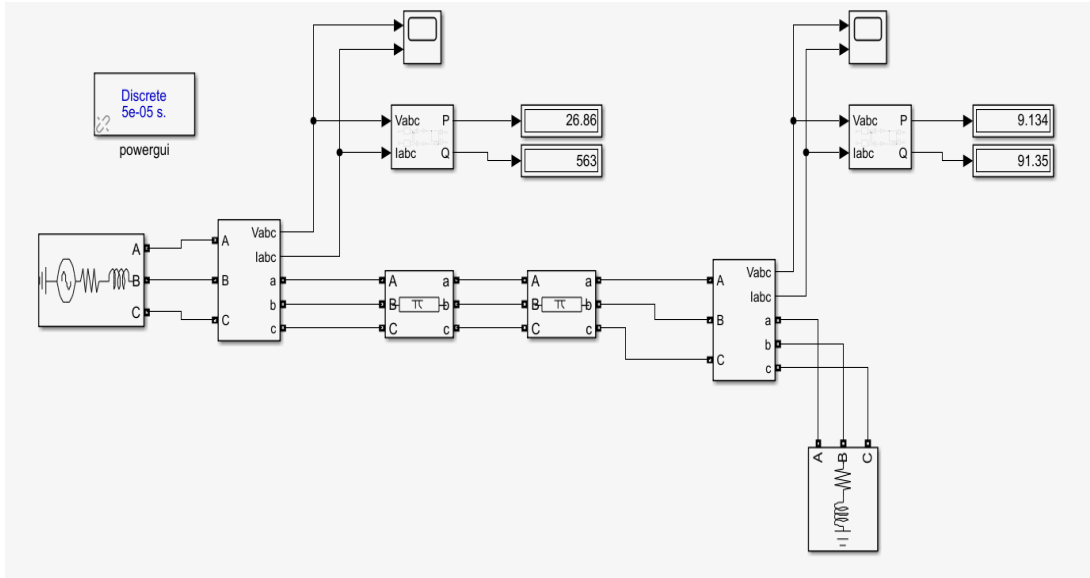


Figura 27. Simulación sin Statcom

Fuente: Elaboración propia

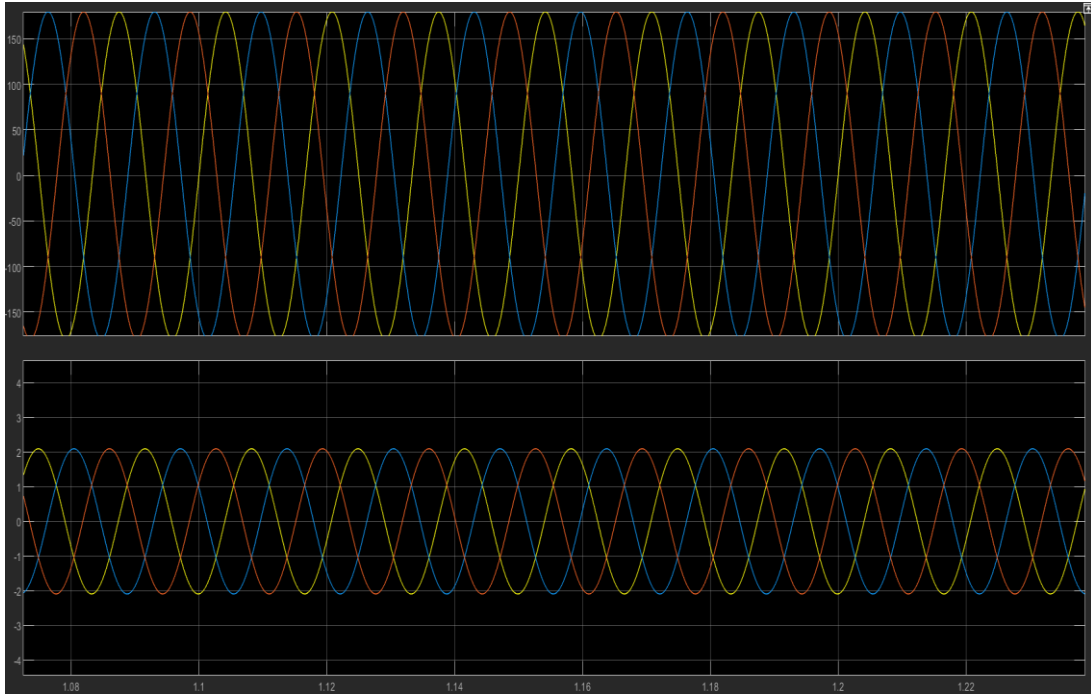


Figura 28. Forma de onda del voltaje y corriente del sistema trifásico sin Statcom

Fuente: Elaboración propia

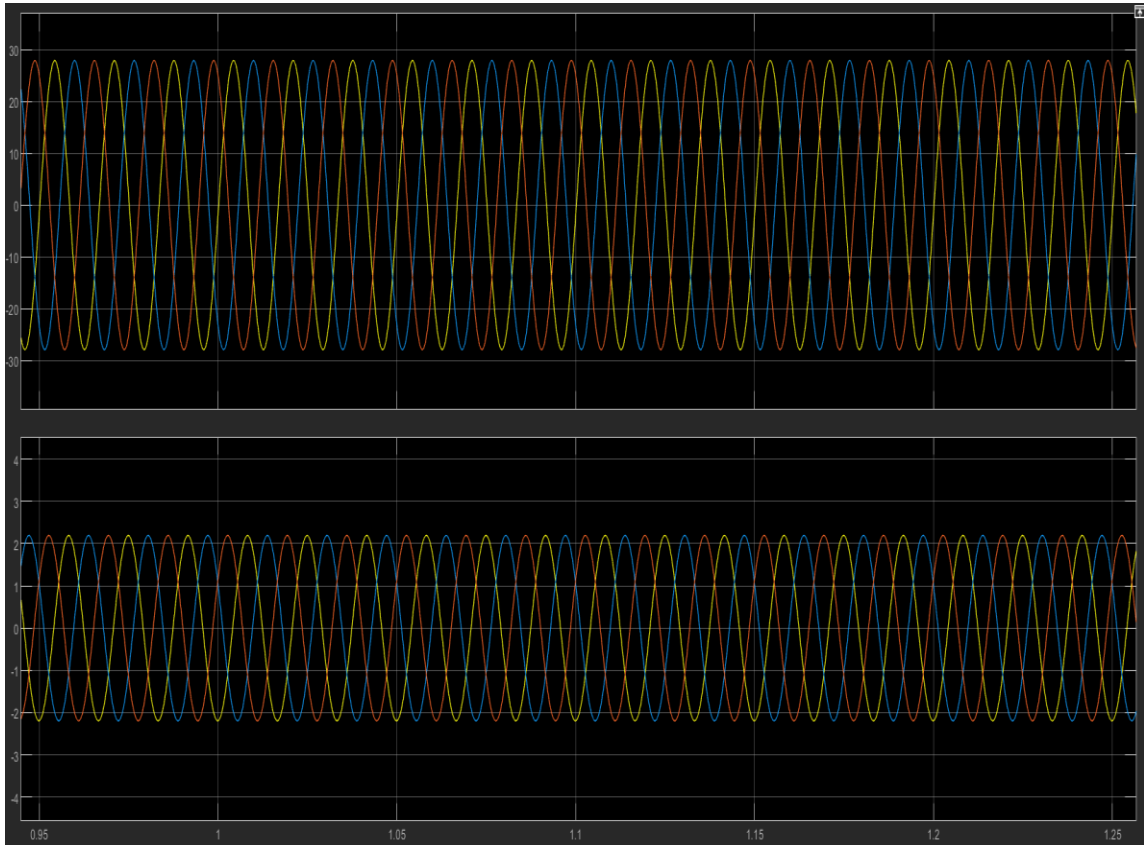


Figura 29. Forma de onda del voltaje y corriente de la carga sin Statcom

Fuente: Elaboración propia

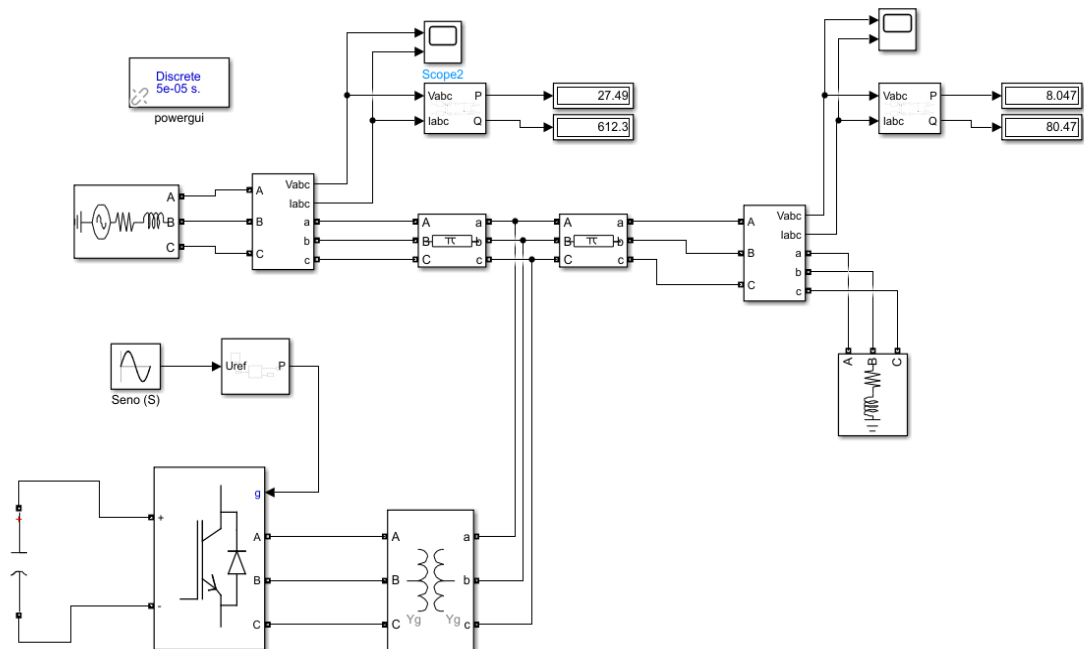


Figura30. Simulación con Statcom

Fuente: Elaboración propia

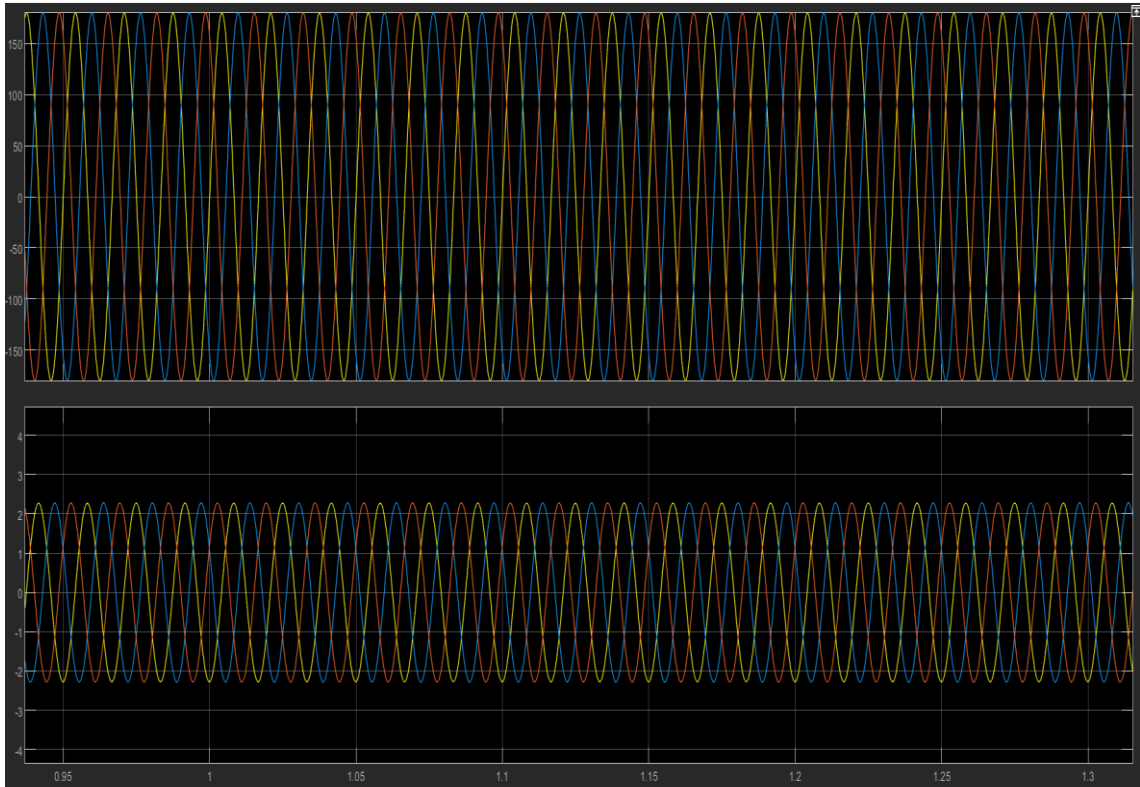


Figura 31. Forma de onda del voltaje y corriente del sistema trifásico con Statcom

Fuente: Elaboración propia

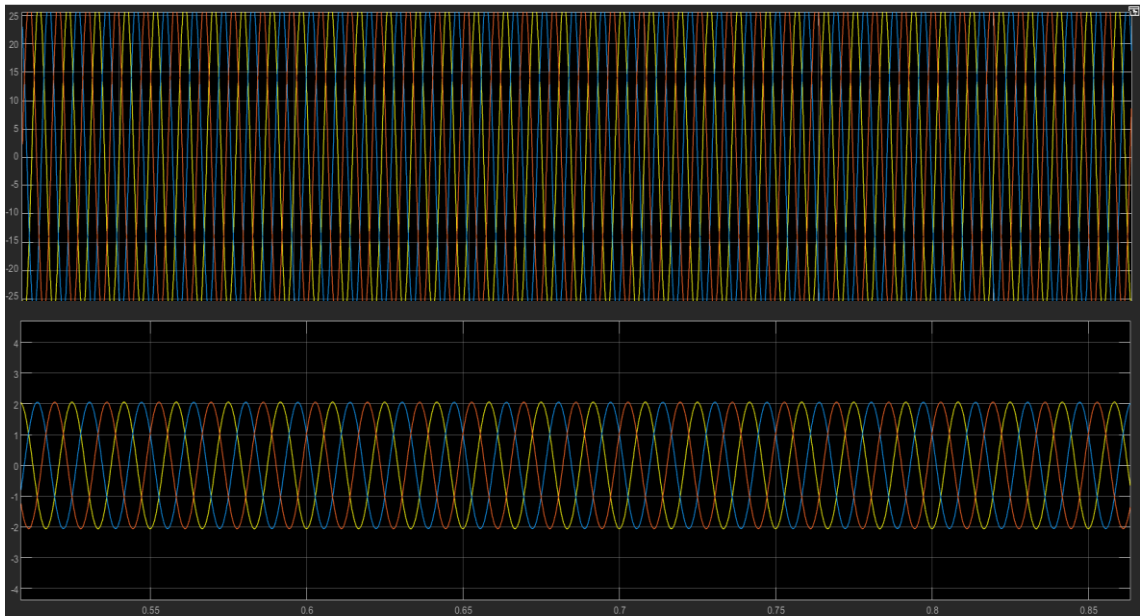


Figura 32. Forma de onda del voltaje y corriente de la carga con Statcom

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de 6.1, se está contrastando las hipótesis, no necesitando fórmulas matemáticas, es decir; se demuestra:

Hipótesis general

HG: El modelamiento y simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásica, basada en un inversor SPWM, evita el deterioro de la calidad de energía del suministro eléctrico.

Hipótesis específicas

HE<sub>1</sub>: El uso de software especializado, en un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mejora la calidad de energía eléctrica.

HE<sub>2</sub>: El uso del modelo diseñado, genera e inyecta potencia reactiva o absorbe en un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basada en un inversor SPWM.

HE<sub>3</sub>: El diseño de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM es posible la simulación.

HE<sub>4</sub>: El compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, controla la potencia reactiva inyectada o absorbida a la red eléctrica.

## 6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares

Después de analizar los resultados, se confirma la investigación de José H. Vivas, (2004) de la Universidad Simón Bolívar, Simulación en ATP del compensador estático de potencia reactiva (STATCOM) utilizando técnicas de modulación SPWM. El investigador concluyo que el control implementado en el modelo desarrollado está basado en la teoría de control DQ y en técnicas de modulación sinusoidal de ancho de pulso (SPWM). Se coincide que los resultados obtenidos demuestran la factibilidad operacional del STATCOM en sistemas de transmisión para el control de voltajes a través del intercambio reactivo.

Así también, 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 (SEP). 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 (SEP).

### 6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

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

1. El modelamiento y simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásica, basada en un inversor SPWM, evita el deterioro de la calidad de energía del suministro eléctrico.
2. El uso de software especializado, en un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mejora la calidad de energía eléctrica.
3. El diseño de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM es posible la simulación.
4. El compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, controla la potencia reactiva inyectada o absorbida a la red eléctrica.



## RECOMENDACIONES

1. El modelo matemático del compensador expresado en una matriz de funciones de conmutación, es recomendable utilizar la transformación de Park para convertir un sistema trifásico en componentes ortogonales e invariantes en el tiempo, considerando una referencia rotativa a una velocidad angular  $w$ .
2. Para simular el compensador estático es recomendable utilizar la última versión del software de Matlab 2022 a, para la obtención rápida de los resultados.
3. Para ver la mejora de la calidad del suministro eléctrico al utilizar el compensador estático, es recomendable aplicarlo a zonas rurales.
4. Para lograr mejorar la calidad de energía del suministro eléctrico es recomendable utilizar un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico basado en un inversor SPWM, debido su gran eficacia reduciendo en gran parte la generación de armónicos, a lo obtenible por el método de frecuencia conmutada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vivas N. Suárez P. José, José Expósito L, Jonathan, "Simulación en ATP del Compensador Estático de Potencia Reactiva (STATCOM) utilizando Técnicas de Modulación SPWM", Universidad Simón Bolívar, Venezuela 2004
- [2] Linda Hassaine, "Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para Inversores. Aplicación a Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red". España 2010
- [3] L. D. Aponte Primo, "Nuevas tecnologías de compensadores de potencia reactiva", Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2011
- [4] H.G. Sarmiento, "*Algunas consideraciones para identificar la aplicación de controladores FACTS en los sistemas de transmisión*", Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cigré-México Bienal, 2001
- [5] J. Ramírez R. Dávalos, "*Características Funcionales del DSTATCOM*", CINVESTAV-I.P.N., Cigré-México Bienal 2001
- [6] J. F., Petit, "Topologías y algoritmos de control para filtros activos aplicados a la mejora de la calidad de suministro eléctrico". Anteproyecto de tesis doctoral Universidad Carlos III de Madrid, 2005
- [7] H.W. Dommel. *EMTP Theory Book*, 2nd ed., Microtran Power Systems Analysis Corporation, 1996.
- [8] Henao, H. Cao E.T. "Simulation des associations convertisseurs-machines: applications à lamachine à induction". Ph.D. thesis, Inp Grenoble. 1990.
- [9] O. Trad. "Transitorios electromagnéticos, Módulo 1: Simulación". Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1990
- [10] A. Greenwood "*Electrical Transients in Power Systems*". ed. John Wiley & Sons. 1997
- [11] J. Martínez Velasco. "Sistemas flexibles de transporte y distribución de energía eléctrica". Universidad Politécnica de Catalunya. 1999.
- [12] R. Rüdenberg. *Transient Performance of Electric Power Systems. Phenomena in Lumped Networks*. ed. McGraw-Hill, 1952
- [13] J. Arrillaga y C. P. Arnold. *Computer Analysis of Power Systems*. ed. Jhon Wiley & Sons, 1992

- [14] Kundor, P. *Power Systems Stability and Control*. EPRI Press. McGraw-Hill. 1994
- [15] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, *Understanding FACTS Concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York, 1999, pp: 1-20, 179-195.
- [16] R.Abidi, M.Nour, *Analysis of a D-STATCOM SPWM in a 25kV Power Distribution Systems using Simulink*, International Journal of Electrical and Electronics research, Vol. 2, Issue 2, pp: (26-34), Month: April - June 2014.
- [17] D. A. Aguilar Peñaherrera, L. A. Gavilanes Ortiz, "Diseño y simulación del control de un compensador sincrónico estático (STATCOM)". 2012 <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/45646>
- [18] J. López Merino, "Estudio y simulación de un STATCOM conectado a una red UC3M" Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2016  
<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/27011>

# ANEXOS

A: Matriz de consistencia

**Título del Proyecto: “Modelamiento y Simulación de un compensador estático de potencia reactivo, de distribución trifásica basado en un inversor SPWM”**

| PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA   | OBJETIVOS   | VARIABLES E INDICADORES   | HIPÓTESIS  | METODOLOGÍA  |
|---|---|---|--|--|
| <p>Problema General<br/>PG. ¿Cómo el Modelamiento y Simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, evita el deterioro de la calidad de energía del suministro eléctrico?</p> <p><u>Problemas Específicos</u><br/>PE1. ¿Cómo el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mejora la calidad de energía del suministro eléctrico?</p> <p>PE2. ¿Cómo el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, mejora la calidad de energía del suministro eléctrico de modo tal que puede ser modelado?</p> <p>PE3. ¿Cómo el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, puede ser simulado?</p> <p>PE4. ¿Cómo el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM controla la potencia reactiva inyectada o absorbida a la red eléctrica?</p> | <p>Objetivo General<br/>OG Modelar y simular un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM para evitar el deterioro de la calidad de energía del suministro eléctrico.</p> <p><u>Objetivos Específicos</u><br/>O1Comprender como el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mejora la calidad de energía del suministro eléctrico.<br/>O2Modelar un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mediante la electrónica de potencia para generar e inyectar potencia reactiva o absorber para mejorar la calidad de energía del suministro eléctrico.<br/>O3Simular el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM.<br/>O4Comprobar como el compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM, controla la potencia reactiva inyectada o absorbida a la red eléctrica.</p> | <p>VARIABLES</p> <p><u>Variables Independientes</u><br/>X: Compensación reactiva estático electrónico.<br/><u>Variables dependientes</u><br/>Y: Estabilidad y calidad del suministro eléctrico.<br/><u>Variable interdependiente</u><br/>Z: Distorsión armónica total de voltaje (THD<sub>v</sub>)</p> <p><u>Indicadores</u><br/>X1: carga reactiva<br/>X2: tensión de la Red<br/>X3: corriente de consumo (medidor)<br/>X4: corriente de consumo de la carga.<br/>X5: corriente del compensador<br/>Y1: índice de modulación de amplitud del inversor<br/>Y2: frecuencia constante del inversor SPWM.<br/>Y3: señal modulante: onda senoidal.<br/>Y4: señal portadora: onda triangular.<br/>Z1: contenido armónico de la tensión</p> | <p>Hipótesis general<br/>HG: El modelamiento y simulación de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basada en un inversor SPWM, evita el deterioro de la calidad de energía del suministro eléctrico.</p> <p><u>Hipótesis Específicas</u><br/>H<sub>1</sub>: El uso de software especializado, en un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM mejora la calidad de energía del suministro eléctrico.<br/><br/>H<sub>2</sub>: El uso del modelo diseñado, genera e inyecta potencia reactiva o absorbe en un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basada en un inversor SPWM.<br/><br/>H<sub>3</sub>: El diseño de un compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM es posible la simulación.<br/>H<sub>4</sub>: El compensador estático de potencia reactiva de distribución trifásico, basado en un inversor SPWM controla la potencia reactiva inyectada o absorbida a la red eléctrica.</p> | <p><u>1Tipo de investigación</u><br/>Tipo descriptivo.<br/><u>Diseño de la investigación</u><br/>No experimental<br/><u>2 Método de investigación</u><br/>No experimental<br/><u>3 Población y muestra</u><br/>Comprende todos los componentes eléctricos y electrónicos del compensador, no se utilizaron población y la muestra coincide con la población<br/><u>4Lugar de estudio y período desarrollado</u><br/>Se llevó a cabo en el Laboratorio de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Callao, ubicada en el distrito de Bellavista, Provincia Constitucional del Callao<br/>El período fue de enero a setiembre 2023<br/><u>5Técnicas e instrumentos para la información</u><br/>a. Técnicas para recolectar información documental, las fichas son instrumentos para recolectar dicha información.<br/>b. Técnicas para recolección información estadística.<br/>c. Técnicas para recolectar información empírica:<br/>- Observación directa.<br/>Las técnicas de recolección, la observación con los cuales se usó el programa, teniendo como instrumento de simulación del proceso con el software dedicado, suponiendo que la planta tiene incertidumbre en los parámetros del sistema, consideremos parámetros nominales<br/><u>6Análisis y procesamiento de datos.</u><br/>Se utilizó la teoría de la identificación de sistemas, así como el software utilizando gran cantidad de estratos de la información, basada en procedimientos estadísticos que permite realizar validaciones con patrones ya establecidos, para este trabajo de investigación, de igual manera se utilizó el software Matlab-Simulink.</p> |

## MATLAB

### Configuración de la fuente trifásica:

Block Parameters: Three-Phase Source

Three-Phase Source (mask) (link)

Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters Load Flow

Configuration: Yg

Source

Specify internal voltages for each phase

Phase-to-phase voltage (Vrms): 220

Phase angle of phase A (degrees): 0

Frequency (Hz): 60

Impedance

Internal  Specify short-circuit level parameters

Source resistance (Ohms): 1e-6

Source inductance (H): 1e-6

Base voltage (Vrms ph-ph): 220

OK Cancel Help Apply

### Configuración de las 2 líneas de transmisión:

Block Parameters: Three-Phase PI Section Line

Three-Phase PI Section Line (mask) (link)

This block models a three-phase transmission line with a single PI section. The model consists of one set of RL series elements connected between input and output terminals and two sets of shunt capacitances lumped at both ends of the line.

RLC elements are computed using hyperbolic corrections yielding an exact representation in positive- and zero-sequence at specified frequency only. To obtain an extended frequency response, connect several PI section blocks in cascade or use a Distributed Parameter line.

Parameters

Line length (km): 100

Frequency used for rlc specification (Hz): 60

Positive- and zero-sequence resistances (Ohms/km) [ r1 r0 ]:

[ 0.01273 0.3864 ]

Positive- and zero-sequence inductances (H/km) [ l1 l0 ]:

[ 0.9337e-3 4.1264e-3 ]

Positive- and zero-sequence capacitances (F/km) [ c1 c0 ]:

[ 12.74e-9 7.751e-9 ]

OK Cancel Help Apply

Configuracion de la carga RL:

Block Parameters: Three-Phase Series RLC Load ×

Three-Phase Series RLC Load (mask) (link)  
Implements a three-phase series RLC load.

Parameters Load Flow

Configuration Y (grounded) ▼

Nominal phase-to-phase voltage  $V_n$  (Vrms)  ⋮

Nominal frequency  $f_n$  (Hz):  ⋮

Specify PQ powers for each phase

Active power  $P$  (W):  ⋮

Inductive reactive power  $Q_L$  (positive var):  ⋮

Capacitive reactive power  $Q_c$  (negative var):  ⋮

Measurements Branch voltages and currents ▼

### Configuración para el statcom:

#### Configuración del transformador trifásico:

Block Parameters: Three-Phase Transformer (Two Windings) [X]

Three-Phase Transformer (Two Windings) (mask) (link)

This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Winding 1 connection (ABC terminals): Yg

Winding 2 connection (abc terminals): Yg

Core

Type: Three single-phase transformers

Simulate saturation

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

#### Configuración del bridge de igt:

Block Parameters: Universal Bridge [X]

Universal Bridge (mask) (link)

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. Press Help for suggested snubber values when the model is discretized. For most applications the internal inductance Lon of diodes and thyristors should be set to zero

Parameters

Number of bridge arms: 3

Snubber resistance Rs (Ohms)

1e5

Snubber capacitance Cs (F)

inf

Power Electronic device: IGBT / Diodes

Ron (Ohms)

1e-6

Forward voltages [ Device Vf(V) , Diode Vfd(V)]

[ 0 0 ]

Measurements: None

OK Cancel Help Apply



### Configuración del generador de PWM:

Block Parameters: PWM Generator (Multilevel) [X]

PWM Generator (Multilevel) (mask) (link)

Generate pulses for PWM-controlled modular multilevel converter.

For half-bridge converter, carriers are phase-shifted by 360 degrees/number of bridges. For full-bridge converter, carriers are phase-shifted by 180 degrees/number of bridges.

Parameters

Bridge type:

Half-bridge  Full-bridge

Number of bridges: 3

Carriers frequency (Hz): 540

Sample time (s): 0

Show carriers output

OK Cancel Help Apply

### Configuración de la onda seno:

Block Parameters: Seno (S) [X]

parameters in the two types are related through:

Samples per period =  $2 * \pi / (\text{Frequency} * \text{Sample time})$

Number of offset samples =  $\text{Phase} * \text{Samples per period} / (2 * \pi)$

Use the sample-based sine type if numerical problems due to running for large times (e.g. overflow in absolute time) occur.

Parameters

Sine type: Time based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 0.9

Bias: 0

Frequency (rad/sec): 377

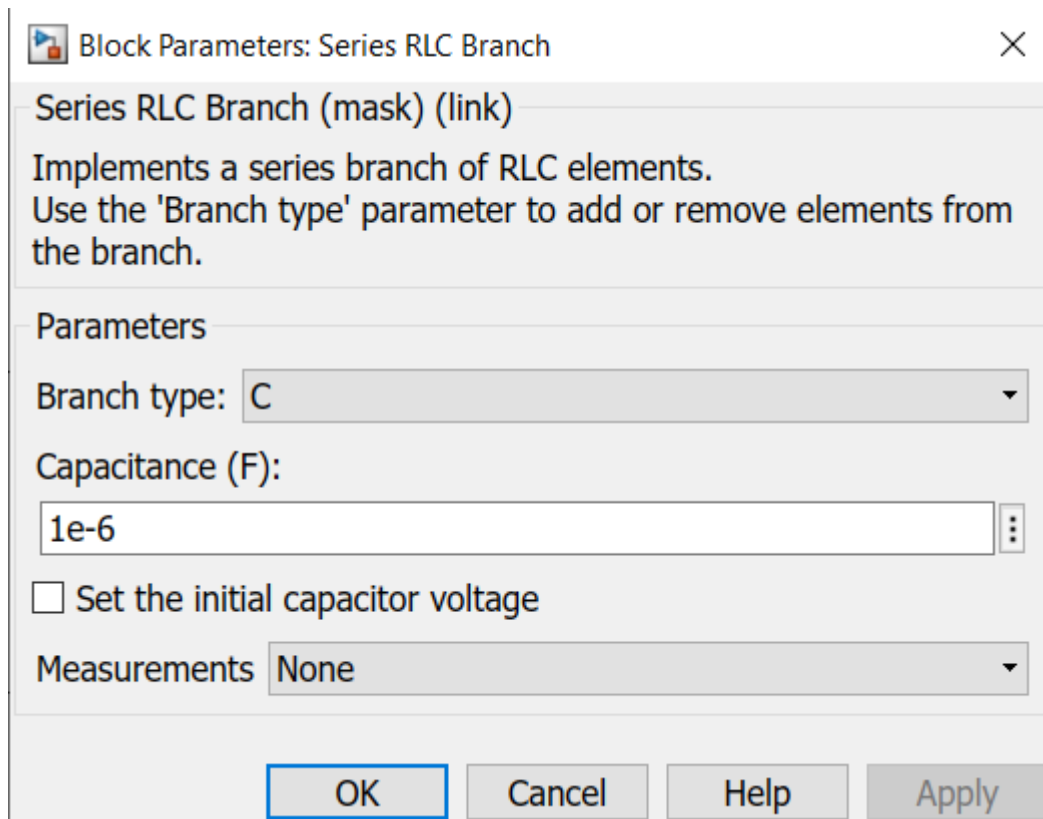
Phase (rad): 0

Sample time: 0

Interpret vector parameters as 1-D

? OK Cancel Help Apply

Configuración del capacitor:



Block Parameters: Series RLC Branch

Series RLC Branch (mask) (link)

Implements a series branch of RLC elements.  
Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.

Parameters

Branch type: C

Capacitance (F):  
1e-6

Set the initial capacitor voltage

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Apéndice

