ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO SEDE LATACUNGA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA ESPECIALIDAD INSTRUMENTACIÓN

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO ESPECIALIDAD INSTRUMENTACIÓN

"ESTUDIO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO, DE UN SISTEMA DIFUSO PARA CONTROL DE BANCO DE CAPACITORES PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA".

MILTON FABRICIO PÉREZ GUTIÉRREZ

LATACUNGA – ECUADOR

2006

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Milton Fabricio Pérez Gutiérrez, bajo nuestra supervisión.

_____

Ing. Marcelo Silva

DIRECTOR DE TESIS

_____

Ing. José Luis Carrillo

CODIRECTOR DE TESIS

Dedicatoria

Todo el tiempo y el esfuerzo dedicado, ha sido solamente por ustedes.

Agradecimiento

Deseo agradecer a todas las personas que me brindaron su ayuda en los momentos más difíciles de mi vida en especial a mis padres, a mi hermano, a mi hermana, mi esposa y mi hijo, que tuvieron la paciencia de ver culminar un objetivo.

Y a todos esos excelentes amigos que he logrado cosechar a través del tiempo.

Gracias a todos ellos

ÍNDICE DE TABLAS

1.1 Adverbios modificadores para lenguaje difuso…….. 32
1.2 Diferencias entre Lógica Clásica y Lógica Difusa……. 39
2.1: Carga normalizada para transformadores de potencial…….. 53
2.2: Límites del factor de corrección del transformador de potencial…….. 53
2.3: Errores máximos admisibles para transformadores de potencial…….. 54
2.4: Voltaje secundario nominal Norma ASA…….. 54
2.5: Voltaje secundario nominal Norma VDE…….. 55
2.6 Tolerancia de Capacitores……... 62
2.7 Factor para determinar la potencia reactiva capacitiva necesaria para corregir el factor de potencia……. 68
2.8 Capacidad de los condensadores y sus dimensiones……... 69
2.9. Fuentes de frecuencia armónicas……. 86
2.10. Fuentes de frecuencia no armónicas…….. 87
2.11. Receptores y espectro de corrientes armónicas inyectadas por diferentes cargas…. 88
3.1 Cálculo de los LiCi y la frecuencia de corte…….. 114
3.2 Análisis de Función de Membresía……. 115
3.3 Datos Simulados……. 127
4.1 Datos del Factor de Potencia de Desplazamiento Simulado, Real sin corrección… 138
4.2 Datos del Factor de Potencia de Desplazamiento Simulado, Real corregido…. 139

INDICE DE FIGURAS

2.1 Ejemplo de conjuntos difusos……. 26
2.2 Concentración……. 30
2.3 Dilatación……. 30
2.4 Intensificación del contraste……. 31
2.5 Difuminación……..... 32
2.6 Ecuación y Función de Pertenencia Triangular……..... 33
2.7 Ecuación y Función de Pertenencia Gamma……. 33
2.8 Ecuación y Función de Pertenencia Gamma aproximación lineal……. 34
2.9 Ecuación y Función de Pertenencia S…… 34
2.10 Ecuación y Función de Pertenencia Gaussiana…… 34
2.11 Ecuación y Función de Pertenencia Trapezoidal…….. 35
2.12 Ecuación y Función de Pertenencia Pseudo-Exponencial…… 35
2.13 Ecuación y Función de Pertenencia Trapecio Extendido……. 36
2.14 Función min., T-norma o Intersección……. 37
2.15 Función máx., S-norma o Unión……..... 37
2.16. Complemento……... 38
2.17 Modelo Difuso……... 40
2.18 Símbolos de Condensadores…….. 58
2.19 Modelo de Capacitor Real……. 58
2.20 Capacitores para corrección del Factor de Potencia…….. 69
2.21 Carga Pura Inductiva…….. 71
2.22 Corriente Inductiva y Capacitiva…… 72
2.23 Factor de Potencia (cosθ) casi 1…….. 73
2.24 Disminuye el Factor de Potencia (cosθ)…….. 74
2.25 Señal cuadrada……. 77
2.26. Espectro de frecuencias de la señal cuadrada……. 78
2.27: Reconstitución de una señal cuadrada…… 78

2.28. Voltaje y Corriente Sinusoidales……. 79
2.29 Corriente no Sinusoidal……. 80
2.30 Filtro Shunt pasivo LC…….. 92
2.31 Circuito equivalente para la componente armónica n-esima……. 92
2.32: flujo de señal de un simple vínculo de comunicación serial de datos……... 96
3.1. Circuito equivalente de una carga……..... 105
3.2 Forma de onda de tensión y corriente para una carga residencial…… 105
3.3 Fasores de corriente inductiva y capacitiva, y voltaje…….. 107
3.4: Funciones de Membresía……..... 116
3.5: Reglas Difusas……. 117
3.6: Interfaz de defusificasión……..... 118
3.7. Visor de Reglas…… 119
3.8 Simulación del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse……..... 120
3.9 Simulación de las ondas de Voltaje y Corriente sin corregir el factor de potencia……... 121
3.10 Conexión de capacitores necesarios para mejorar el factor de potencia y el nuevo valor factor de potencia……..…… 122
3.11 Ondas de Voltaje y Corriente corregido el factor de potencia……... 123
3.12 Simulación del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse……... 123
3.13 Simulación de las ondas de Voltaje y Corriente sin corregir el factor de potencia…… 124
3.14 Conexión de capacitores necesarios para mejorar el factor de potencia y el nuevo valor factor de potencia…… 125
3.15 Ondas de Voltaje y Corriente corregido el factor de potencia……..... 126
3.16 Simulación del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse……..... 126
3.17 Simulación de las ondas de Voltaje y Corriente sin corregir el factor de potencia……. 127
4.1 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse……..... 132
4.2 Ondas de Voltaje (azul) y Corriente (verde) sin corregir el factor de potencia……..... 132

4.3 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento conectado los capacitores…… 133
4.4 Ondas de Voltaje (azul) y Corriente (verde) corregido el factor de potencia…… 134
4.5 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse…… 134
4.6 Ondas de Voltaje (azul) y Corriente (verde) sin corregir el factor de potencia……...… 135
4.7 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento conectado los capacitores…… 136
4.8 Ondas de Voltaje y Corriente corregido el factor de potencia…….. 137
4.9 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento, no necesita conectar los capacitores……..... 137
4.10 Simulación de las ondas de Voltaje y Corriente no necesita corregir el factor de potencia……..... 138

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN…… 2

DEDICATORIA……... 3

AGRADECIMIENTO…….. 4

ÍNDICE DE TABLAS…….. 5

ÍNDICE DE FIGURAS…… 6

ÍNDICE GENERAL……. 9

PRÓLOGO…… 12

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN…… 13

1.1 TEMA…… 13

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA……. 13

1.3 PRESENTACIÓN……..... 13

1.4 JUSTIFICACIÓN……. 14

1.5 ALCANCE…… 15

1.6 OBJETIVOS……. 15

1.6.1 Objetivo General…….. 15

1.6.2 Objetivos Específicos…….. 15

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO……..... 16

2.1 FUNDAMENTOS DE LÓGICA DIFUSA…….. 16

2.1.1 Introducción a la lógica difusa……. 16

2.1.2 Historia…… 16
2.1.3 Conceptos básicos de lógica difusa……. 17
2.1.4 Conjuntos difusos…… 20
2.1.5 Operaciones entre conjuntos difusos…… 36
2.2 MODELOS DIFUSOS……. 39
2.2.1 Modelo lingüístico…… 39
2.2.2 Modelos difusos lingüísticos…… 40
2.2.3 Modelo Takagi-Sugeno …….. 42
2.3 ELEMENTOS ELECTRÓNICOS…… 44
2.3.1 Transformador de Corriente (TC)…… 44
2.3.2 Transformador de Potencial……. 51
2.3.3 Capacitores…….. 57
2.4 FACTOR DE POTENCIA…… 70
2.4.1 Factor de Potencia de Desplazamiento (DPF)……..... 70
2.4.2 Conceptos básicos sobre armónicas……. 75
2.4.2.1 Análisis de Fourier…….. 75
2.4.2.2 Factor de potencia y potencia reactiva en redes con armónicas…. 79
2.4.2.3 Factores de distorsión……. 83
2.4.2.4 Origen de los armónicos……. 84
2.5 TECNICAS DE MITIGACIÒN DE ARMÓNICOS…… 89
2.5.1 Uso de Filtros Shunt…… 89
2.5.2 Uso de conversores estáticos de potencia Multipulso……. 90
2.6 INTERFACES DE PUERTOS DE MÁQUINA CON DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS…….. 93
2.6.1 Análisis de herramientas de conexión……. 93
2.6.2 Hardware adecuado para la interacción de dispositivos…….. 95
2.7 HERRAMIENTAS DE SIMULACION…… 97
2.7.1 MatLab (MATrix LABoratory)…… 97
2.7.2 Simulink…… 100

CAPITULO III: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO……. 104
3.1 INTRODUCCIÓN……. 104
3.2 CÁLCULO DEL FACTOR DE POTENCIA……. 104

3.3 CÁLCULO DEL NÚMERO MÍNIMO DE CAPACITORES PARA EL BANCO DE CAPACITORES……... 110
3.4 CÁLCULO DEL FILTRO PARA ATENUAR LOS ARMÓNICOS…….. 112
3.5 DISEÑO DEL CONTROLADOR CON LÓGICA DIFUSA……... 115
3.6 SIMULACIÓN DEL SISTEMA…….. 119
3.6.1 CASO A: Resistencia de 300 Ω y Reactancia Inductiva de 300 Ω…. 120
3.6.2 CASO B: Resistencia de 300 Ω y Reactancia Inductiva de 150 Ω…. 123
3.6.3 CASO C: Resistencia de 300 Ω y Reactancia Inductiva de 100 Ω….. 126
3.7 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO……... 128
3.7.1 Adquisición de Datos……... 128
3.7.2 Programación……... 129
3.7.3 Salida…… 129

CAPITULO IV: PRUEBAS…….. 130
4.1 REALIZACIÓN DE TODAS LAS PRUEBAS NECESARIAS PARA DEMOSTRAR EL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO……. 130
4.1.1 CASO A: Resistencia de 300Ω y Reactancia Inductiva de 300Ω…… 132
4.1.2 CASO B: Resistencia de 300Ω y Reactancia Inductiva de 150Ω…… 134
4.1.3 CASO C: Resistencia de 300Ω y Reactancia Inductiva de 100Ω……. 137
4.1.4 Análisis del Factor de Potencia de Desplazamiento Sin Corrección.... 138
4.1.5 Análisis del Factor de Potencia de Desplazamiento Con Corrección… 139

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…….. 140
5.1 CONCLUSIONES……. 140
5.2 RECOMENDACIONES……..... 141
5.3 BIBLIOGRAFÍA…….. 142
5.4 PÁGINAS ELECTRÓNICAS…….. 142

ANEXOS…….. 143

PRÓLOGO

La técnica conocida como Lógica Difusa (Fuzzy Logic), es un tipo de lógica que reconoce más que simples valores verdaderos y falsos. Con lógica difusa, las proposiciones pueden ser representadas con grados de veracidad o falsedad. Por ejemplo, la sentencia "hoy es un día soleado", puede ser 100% verdad si no hay nubes, 80% verdad si hay pocas nubes, 50% verdad si existe neblina y 0% si llueve todo el día.

Los sistemas basados en lógica difusa, imitan la forma de toma de decisiones de los humanos, con la ventaja de ser mucho más rápidos. En la lógica difusa, se usan modelos matemáticos para manipular nociones subjetivas, como *mucho/poco/nada*, para valores concretos que puedan ser manipuladas por los ordenadores o microcontroladores. Esta técnica se ha empleado con bastante éxito en la industria, principalmente en los países industrializados.

En la actualidad las Empresas Distribuidoras de Servicio Eléctrico y muchas de las Plantas Industriales se han visto en la necesidad de mejorar el factor de potencia. Desde hace muchos años se ha utilizado el control manual de la conexión y desconexión del banco de capacitores, las cuales pueden mejorar sin duda alguna el factor de potencia pero la mayor parte del tiempo podrían estar conectadas consumiendo energía y no mejorándola.

La solución se ha realizado al usar Lógica Difusa (Fuzzy Logic), este decide la cantidad de capacitores que se conectan en cualquier instante de tiempo, manteniendo el factor de potencia dentro del rango óptimo, que la ley de empresas de distribución indica, sin sobrepasar los límites mínimo y máximo.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 TEMA.

Estudio, Diseño y Construcción de un Prototipo, de un Sistema Difuso para Control de Banco de Capacitores para mejorar el Factor de Potencia.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Se podría desarrollar e implementar un prototipo de sistema inteligente que permita el Control del un Banco de Capacitores con lógica difusa, para mantener en condiciones favorables el factor de potencia?

¿Se puede aplicar los principios de lógica difusa para posteriormente implementarlas en el estudio del sistema inteligente?

¿Cuál es la interacción de los sensores y MatLab con el fin de simular el control adecuado en el sistema?

1.3 PRESENTACIÓN

En la actualidad las distribuidoras de servicio eléctrico (además de muchas de las Plantas Industriales) se han visto en la necesidad de mejorar el factor de potencia, para brindar un servicio eficiente a la colectividad en especial a las industrias que utilizan

electricidad con el fin de que sus productos tengan la mejor calidad posible. Desde hace muchos años se ha utilizado el control manual de conexión y desconexión del banco de capacitores, las cuales mejoran el factor de potencia pero la mayor parte del tiempo podrían estar conectadas consumiendo energía y sobrepasando su valor máximo.

La solución puede estar a la vuelta de la esquina con la ayuda de nuevas técnicas que en la actualidad se están investigando como es Lógica Difusa (Fuzzy Logic), usando los sensores correspondientes que puedan comunicar en tiempo real a la Unidad Central de Control (computadora o microcontrolador incluido en el sistema inteligente) todas las irregularidades, la cual procesa los datos recibidos de los sensores y reenvía información capaz de controlar y normalizar esas irregularidades en tales condiciones.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La implementación de este proyecto se lo puede realizar en empresas de distribución eléctrica, desde las cuales deben salir con un factor de potencia lo más óptimo posible, permitiendo así mantener un nivel estándar de calidad en las industrias, casas, y demás lugares donde se utilice electricidad.

En la actualidad las empresas de servicio eléctrico utilizan manualmente la conexión y desconexión del banco de capacitores completo para mejorar el factor de potencia, las cuales pueden estar conectadas mejorando o absorbiendo energía sin mejorar, o peor aun en ciertas horas del día podrían necesitar que los capacitores ingresen a funcionar pero estos sigan desconectados; pero estos no deberían entrar a funcionar obligatoriamente todos a la vez, sino los que se necesiten en ese momento, por lo tanto una buena técnica para ayudar a resolver este problema es Control con Lógica Difusa, que es una técnica que toma decisiones según el factor de potencia que tenga en ese instante del tiempo.

1.5 ALCANCE

El sistema inteligente constará de un solo módulo, la cual controlará el factor de potencia de acuerdo a las condiciones internas y externas que se presenten. Primero se analizará los principios fundamentales de la lógica difusa (técnica para la inteligencia artificial) necesarios para que pueda tomar decisiones en los momentos, que las condiciones internas cambien.

Luego se establecerán las interfases entre los dispositivos electrónicos y MatLab para poder monitorear y controlar el banco de capacitores. Se construirá el prototipo a escala de un banco de capacitores a escala con las interfases que tendrá el sistema. Finalmente se integrará el programa de MatLab con el prototipo para demostrar su funcionamiento y el aporte que brinda la lógica difusa a la inteligencia artificial.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

- Desarrollar e implementar un prototipo de un sistema inteligente que permita el control del Banco de Capacitores a través de lógica difusa, con el fin de mantener en condiciones favorables el factor de potencia.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Aplicar los principios de la lógica difusa para posteriormente implementarlas en el estudio del sistema inteligente, en el control del factor de potencia.

- Simular las interfases entre los sensores electrónicos y MatLab con el fin de lograr su interacción permanente en el sistema.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS DE LÓGICA DIFUSA

2.1.1 Introducción a la lógica difusa

La lógica difusa ha cobrado vigencia por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos electrónicos de uso doméstico y de entretenimiento, así como también de sistemas de diagnóstico.

De hecho, desde hace década y media, la expedición de patentes industriales de mecanismos basados en la lógica difusa tiene un crecimiento sumamente rápido en todas las naciones industrializadas del orbe.

2.1.2 Historia

Se ha considerado de manera general que el concepto de lógica difusa apareció en 1965, en la Universidad de California en Berkeley, introducido por Lotfi A. Zadeh

La lógica difusa procura crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas. Pretenden producir resultados exactos a partir de datos imprecisos, por lo cual son particularmente útiles en aplicaciones electrónicas o computacionales.

El adjetivo “difuso” se debe a que los valores de verdad no-deterministas utilizados en ellas, tienen por lo general, una connotación de incertidumbre. Por otra parte, desde un punto de vista optimista, lo difuso puede entenderse como la posibilidad de asignar más valores de verdad a los enunciados clásicos de “falso” o “verdadero”.

Desde el punto de vista tecnológico, la lógica difusa se encuadra en el área de Inteligencia Artificial y han dado origen a sistemas expertos de tipo difuso y sistemas de control automático.

2.1.3 Conceptos básicos de lógica difusa

Aristóteles, filósofo griego (384 - 322 a.C.), fue el fundador de la lógica, y establece un conjunto de reglas rígidas para que las conclusiones pudiesen ser lógicamente válidas.

La lógica de Aristóteles llevaba una línea de raciocinio lógico basado en premisas o conclusiones. Como por ejemplo: se ha observado que "todo ser vivo es mortal" (premisa 1), seguidamente se constata que "Sara es un ser vivo" (premisa 2), como conclusión tenemos que "Sara es mortal".

Desde entonces, la lógica Occidental, así llamada, ha sido binaria, esto es, una declaración es falsa o verdadera, mas no puede ser al mismo tiempo parcialmente verdadera y parcialmente falsa.

Esta suposición de la ley da una contradicción, que coloca que "U es no U" cubriendo todas las posibilidades, forman la base de pensamiento lógico Occidental.

La lógica difusa (Fuzzy Logic) viola estas suposiciones. Los conceptos de dualidad, establecen que algo puede o debe coexistir con su opuesto, mas la lógica difusa parece natural, así mismo inevitable.

La lógica de Aristóteles trata con valores de "verdad" las afirmaciones, clasificándolas como verdaderas o falsas. No obstante, muchas de las experiencias humanas no pueden ser clasificadas simplemente como verdaderas o falsas, si o no, blanco o negro.

Por ejemplo, ¿es aquel hombre alto o bajo? ¿La taza de riesgo para aquel emprendimiento es grande o pequeña? Como responde a estas preguntas ud. si o ud. no, esta respuesta es en la mayoría de veces, incompleta.

La verdad, entre la certeza de ser y la certeza de no ser, existen infinitos grados de no certeza. Esta imperfección intrínseca da información representada en un lenguaje natural, ha sido tratada matemáticamente lo cual no ha pasado con el uso de la teoría de las probabilidades.

La lógica Difusa, como base de la teoría de Conjuntos Nebulosos (Fuzzy Set), se ha mostrado mas adecuada para tratar imperfecciones de información que una teoría de probabilidades.

De forma más objetiva y preliminar, podemos **definir Lógica Difusa como una herramienta capaz de capturar información vaga, en general descritas en un lenguaje natural y las convierte a un formato numérico, de fácil manipulación para los computadores**.

Los términos "largo", "no muy estable" y "muy alta" traen consigo información vaga. La representación de esta información vaga se da a través del uso de conjuntos nebulosos.

Debido a estas propiedades de la capacidad de realizar inferencias, la Lógica Difusa ha encontrado grandes aplicaciones en las siguientes áreas: Sistemas

Especialistas; Computación con Palabras; Raciocinio Aproximado; Lenguaje Natural; Control de Procesos; Robótica; Modelamiento de Sistemas Parcialmente Abiertos; Reconocimiento de Patrones; Procesos de Toma de Decisiones (decision making).

La Lógica Difusa o Lógica Nebulosa, también puede ser definida, como la lógica que soporta los modos de raciocinio que son aproximados, como estamos naturalmente acostumbrados a trabajar.

Está basada en la teoría de los conjuntos nebulosos y difiere de los sistemas lógicos tradicionales en sus características y detalles.

Nuestra lógica, o raciocinio exacto corresponde a un caso límite de raciocinio aproximado, siendo interpretado como un proceso de composición nebulosa.

La lógica difusa, la lógica multivaluada, teoría probabilística, inteligencia artificial y redes neuronales se combinan para que pueda representar al pensamiento humano, o sea, unir la lingüística y la inteligencia humana, pues muchos conceptos son mejores definidos por palabras de lo que puede la matemática.

El término “difuso” procede de la palabra inglesa “fuzzy” que significa “confuso, borroso, indefinido o desenfocado”. Este termino se traduce por “flou” en francés y “aimai” en japonés. Aunque la teoría de conjuntos difusos presente cierta complejidad, el concepto básico es fácilmente comprensible.

Es un tipo de lógica que reconoce más que simples valores verdaderos y falsos. Con la lógica difusa, las proposiciones pueden ser representadas con grados de veracidad o falsedad.

2.1.4 Conjuntos difusos

El concepto formal de conjunto difuso, fundamentado por la Lógica Difusa, fue introducido por Lofti A. Zadeh en 1965.

En la teoría clásica, los conjuntos son denominados "crisp", de tal forma que un elemento dado del universo de discurso (dominio) pertenece o no pertenece al referido conjunto.

En la teoría de los conjuntos difusos existe un grado de pertenencia de cada elemento a un determinado conjunto. Este concepto parece ser bastante natural y fácilmente percibido al examinar una lista de conjuntos:

- conjunto de números naturales (crisp)
- conjunto de caracteres ASCII (crisp)
- conjuntos de hombres altos superior a 1.80m (fuzzy)
- conjunto de clientes con alta rentabilidad (fuzzy)

Existe claramente una diferencia fundamental entre los conjuntos marcados con "crisp" y los conjuntos marcados con "fuzzy". Por ejemplo, presentado un carácter podemos afirmar si ese carácter pertenece o no pertenece al conjunto de los caracteres ASCII (crisp).

Esta pregunta no es tan simple cuando decimos, por ejemplo, con el conjunto de los hombres altos mayores o iguales a 1.80m. ¿Una persona que tenga 1.79 metros de altura, sería considerada en ese conjunto?

Y la que tenga 1.78? Vemos claramente que no existe una frontera bien definida que separe los elementos del conjunto de los hombres altos de los elementos del conjunto de los hombres no altos (fuzzy).

Definición: Un conjunto nebuloso A definido en el universo de discurso U es caracterizado por una función de pertenencia μA, la cual se encuentra en el intervalo [0,1].

μA: U => [0,1]

De esta forma, una función de pertenencia se asocia con cada elemento x perteneciente a U un número real μA(x) en el intervalo [0,1], que representa el grado de pertenencia de que el elemento x pueda pertenecer al conjunto A, esto es, cuanto es posible para el elemento x pertenecer al conjunto A.

En un conjunto difuso a cada elemento del universo se le asocia un grado de pertenencia, indica la cercanía que tiene la pertenencia absoluta cuando se acerca a uno y la no pertenencia absoluta cuando se acerca a cero. Teniendo entre cero y uno un numero infinito de valores reales.

En los conjuntos difusos relajamos la restricción de que la función de pertenencia vaga ó 0 ó 1, y dejamos que tome valores en el intervalo [0,1]. La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge de un hecho: hay conceptos que no tienen límites claros.

Por ejemplo: ¿Una persona que mide 1.80 es alta? ¿Una temperatura de 15 grados es baja? Vemos que, a diferencia de lo que ocurre en el caso de las frutas (no hay vaguedad, un alimento o bien es una fruta o bien no lo es), en otras situaciones nos vemos obligados a tratar con ella.

Veamos algunas definiciones útiles:

• Llamaremos **variable lingüística** a aquella noción o concepto que vamos a calificar de forma difusa. Por ejemplo: la altura, la edad, el error, la variación del error... Le aplicamos el adjetivo "lingüística" porque definiremos sus características mediante el lenguaje hablado.

• Llamaremos **universo de discurso** al rango de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística. En el caso de la variable lingüística 'altura de una persona normal', sería el conjunto de valores comprendido entre 1.4 y 2.3 m.

• Llamamos **valor lingüístico** a las diferentes clasificaciones que efectuamos sobre la variable lingüística: en el caso de la altura, podríamos dividir el universo de discurso en los diferentes valores lingüísticos: por ejemplo bajo, mediano y alto.

• Llamaremos **conjunto difuso** a un valor lingüístico junto a una función de pertenencia. El valor lingüístico es el "nombre" del conjunto, y la función de pertenencia se define como aquella aplicación que asocia a cada elemento del universo de discurso el grado con que pertenece al conjunto difuso. Decimos que un conjunto es nítido si su función de pertenencia toma valores en {0,1}, y difuso si toma valores en [0,1].

• Dado un conjunto difuso A, se define como **alfa-corte** de A, al conjunto de elementos que pertenecen al conjunto difuso A con grado mayor o igual que alfa, es decir:

$$A_{\alpha} = \{x \varepsilon X / \mu_A (x) \geq \alpha\}$$

• Se define como **alfa corte estricto** al conjunto de elementos con grado de pertenencia estrictamente mayor que alfa, es decir:

$$A_{\acute{\alpha}} = \{x \varepsilon X / \mu_A (x) > \alpha\}$$

• Se define como **soporte** de un conjunto difuso A, al conjunto nítido de elementos que tienen grado de pertenencia estrictamente mayor que 0, o sea, al alfa-corte estricto de nivel 0.

$$\text{Soporte}(A) = \{x \varepsilon X / \mu_A (x) > 0\}$$

• Se define como **núcleo** de un conjunto difuso A, al conjunto nítido de elementos que tienen grado de pertenencia 1. (alfa-corte de nivel 1)

Núcleo(A) = $\{x \varepsilon X / \mu_A (x) = 1\}$

• Se define la **altura** de un conjunto difuso A como el valor más grande de su función de pertenencia.

• Se dice que un conjunto difuso está **normalizado** si y solo si su núcleo contiene algún elemento (o alternativamente, si su altura es 1), es decir:

$\exists x \in X \ \mu_A (x) = 1$

• El elemento x de U para el cual $\mu_F(x) = 0.5$ se llama el **punto de cruce**.

• Un conjunto difuso cuyo soporte es un único punto x de U y tal que la función de pertenencia de x es 1 (es decir, el soporte coincide con el núcleo y tienen un único punto) se llama un **conjunto difuso unitario (singleton)**.

Una variable lingüística es una forma quintuple V = (N, G, T, X, M),

donde:

- N → variable lingüística V
- G → gramática (adverbios, adjetivos, binarios, etc.)
- T → juego de expresiones lingüísticas resultantes de G (term set)
- X → universo de discurso
- M → semántica de fuzzy set sobre X, de c/expresión lingüística en T

Ejemplo 1

- N = “v1”
- G : adjetivo = “pequeño” | “mediano” | “grande” ;
- T = {“pequeño”, “mediano”, “grande”}
- X = [0, 100]
- M = . . .

Ejemplo 2

- N = “v2”
- G : atómico

  (atómico) := (adjetivo) | (adverbio) (adjetivo) ;

  (adjetivo) := “pequeño” | “mediano” | “grande” ;

  (adverbio) := “por lo menos” | “como mucho” ;
- T = {“pequeño”, “mediano”, “grande”, “por lo menos pequeño”, “como mucho mediano”, “por lo menos grande”, “como mucho pequeño”, “como mucho mediano”, “como mucho grande”}
- X = [0, 100]
- M = …

Ejemplo 3

- N = “v3”
- G: = (atómico) | (atómico) (binario) (atómico) ;

  (atómico) := (adjetivo) | (adverbio) (adjetivo) ;

  (adjetivo) := “nb” | “nm” | “ns” | “z” | “ps”| “pm”| “pb”;

  (adverbio) := “por lo menos” | “como mucho” ;

  (binario) := “y” | “o” ;
- T = . . . (462 elementos)
- X = [−100, 100]
- M = . . .

Ejemplo 4

- N = “v4”
- G: = (exp) ;

  (exp) := (atómico) | “(” (exp) (binario) (exp) “)” | “(not” (exp) “)”;

  (atómico) := (adjetivo) | (adverbio) (adjetivo) | “entre” (adjetivo) “y” (adjetivo) ;

  (adjetivo) := “nb” | “nm” | “ns” | “z” | “ps”| “pm”| “pb”;

  (adverbio) := “por lo menos” | “como mucho” ;

  (binario) := “y” | “o” ;
- T = . . . (infinitamente muchos elementos)
- X = [−100, 100]
- M = . . .

Como definir M?

T es finito (Ejemplo 1 y 2), nosotros podemos definir M(a) para cada **a** ∈ T por separado

Si T es un set grande (Ejemplo 3), este son demasiados elementos

Si T es infinito (Ejemplo 4), esto ya no es posible representarlos

Las variables lingüísticas pueden también contar con modificadores (también lingüísticos) que alteran su valor.

Los modificadores lingüísticos pueden ser definidos matemáticamente, como en el ejemplo de los conjuntos, “bajo” y "muy bajo, donde el modificador “muy” es caracterizado por elevar cada punto de la función de pertenencia al cuadrado, es decir ampliar el rango de variación entre las dos funciones antes mencionadas.

Los conectivos and (y), or(o) y not(no) son equivalentes a las operaciones de intersección, unión y negación de conjuntos, respectivamente, pudiendo dar origen a los conjuntos complejamente definidos, pueden ser representados lingüísticamente de manera simples.

La transición de la pertenencia o no-pertenencia de un elemento, es gradual es decir puede tomar varios valores entre 0 y 1, y esta transición está caracterizada por las funciones siguientes:

$$A=\{(x, \mu A(x)) \mid x \in X \}$$

Donde:

- $\mu A (x)$ → función de pertenencia o membresía
- X → conjunto difuso (universo de discurso)
- x → pertenecen al universo del dominio del problema [0,1]

Consideremos la variable lingüística "Altura de los seres humanos", que toma valores en el universo de discurso U = [1.4, 2.50]. Vamos a hacer una clasificación difusa de los seres humanos en tres conjuntos difusos (o valores lingüísticos): bajos, medianos y altos.

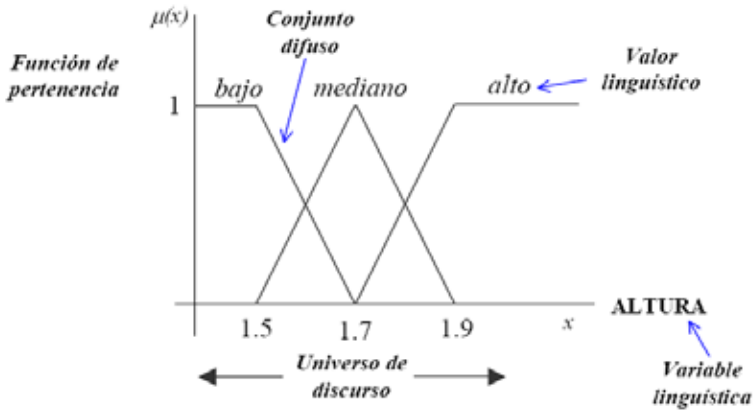

Fig. 2.1 Ejemplo de conjuntos difusos

En la figura 2.1 se ha dibujado 3 conjuntos difusos sobre la variable lingüística altura, cuyos valores lingüísticos asociados son bajo, mediano y alto respectivamente. De este modo si Luís mide 1.80 metros, la lógica difusa nos dice que es un 0.2 mediano y un 0.8 alto.

De este modo expresamos que mientras un elemento puede estar dentro de un determinado conjunto, puede no cumplir las especificaciones de dicho conjunto al cien por cien (por ejemplo, en el caso de Luís, a la vista del resultado podríamos afirmar que es poco mediano y más bien alto).

En este ejemplo, dado el conjunto difuso mediano tenemos que:

- El alfa-corte 0.5 es el intervalo [1.6, 1.8]
- El alfa corte estricto 0.5 es el intervalo (1.6, 1.8)
- El soporte es (1.5, 1.9)
- El núcleo es 1.7
- Es un conjunto difuso normalizado
- Tiene dos puntos de cruce: 1.6 y 1.8

La notación habitual para los conjuntos difusos es la definida por Lofti Zadeh, que es la siguiente: sea A un conjunto difuso definido sobre el universo U:

$A=\{(x,\mu A(x)) / x \in U\}$

Indica que A está formado por todos los pares ordenados x y el resultado de la función de pertenencia μ_A para todo elemento dentro del universo de discurso U. Para denotar el conjunto difuso A:

si el universo es discreto: $\sum_U \mu_A(x)/x$

si el universo es continuo: $F = \int_u \mu_A(x)/x$

¡Cuidado con esta notación! El sumatoria o la integral pierden su significado habitual.

En lógica difusa quieren simbolizar una mera enumeración de tuplas (pares de valores). La barra (/) tampoco indica una fracción sino que simplemente separa los dos elementos de la tupla. Así por ejemplo el conjunto difuso discreto "Lanzado alta del dado" podría definirse como:

$F = \{ 0/1 + 0/2 + 0.3/3 + 0.6/4 + 0.9/5 + 1/6\}$

La parte derecha de la tupla indica el elemento y la parte izquierda el grado de pertenencia. Los conjuntos difusos y las funciones de pertenencia pueden emplearse de dos formas posibles:

a) Para estimar grados de pertenencia a un conjunto. Por ejemplo, si nos dicen que una persona mide 170 cm., ¿en qué grado es una persona alta?

b) Para expresar posibilidades en una situación en la que se dispone de información incompleta. Por ejemplo, si nos dicen que una persona es mediana, ¿cuál será su altura? En este caso la función de pertenencia μ puede interpretarse como una distribución de posibilidad que nos indica la preferencia sobre los valores que una variable de valor desconocido puede tomar.

De este modo vemos que la principal diferencia entre la teoría de conjuntos clásica y la difusa es que mientras que los valores de la función de pertenencia de un conjunto nítido son siempre 0 o 1, la función de pertenencia de un conjunto difuso toma valores en todo el intervalo [0,1], se suele normalizar el grado de pertenencia máximo a 1.

De este modo vemos que, al contrario de los conjuntos nítidos, que pueden definirse de varias formas, los conjuntos difusos vienen siempre definidos por su función de pertenencia.

Etiquetas lingüísticas

Tradicionalmente se han utilizado modificadores de los conjuntos difusos a los que llamamos etiquetas lingüísticas, equivalentes a lo que en lenguaje natural serían los adverbios.

La interpretación en el modelo difuso de estos enunciados consiste en la composición de la función de pertenencia con una operación aritmética simple.

Por ejemplo, es habitual considerar como interpretación del adverbio muy el cuadrado de la función de pertenencia original, Es decir, "Juan es muy alto" se interpretaría como:

$$\mu_{MUY_ALTO_A}(x) = (\mu_{ALTO}(x))^2$$

Las interpretaciones clásicas de los adverbios, no siempre serán las más adecuadas a un problema de representación del conocimiento concreto:

MUY $\mu_{MUY_A}(x) = (\mu_A(x))^2$

De este modo, si el grado de pertenencia de una persona a la clase alto es 0.5, el grado de pertenencia a la clase muy alto es sólo 0.25.

ALGO $\mu_{ALGO_A}(x) = \sqrt{\mu_A(x)}$

Así, si el grado de pertenencia de una persona a la clase alto es 0.5, el grado de pertenencia a la clase algo alto es de 0.707.

Existe todo un catálogo de posibles adverbios y sus modificadores asociados, pero las modificaciones que más usualmente se aplican a un conjunto difuso son las siguientes:

• **Normalización**, al convertir un conjunto difuso no normalizado en uno normalizado (dividiendo por la altura del conjunto).

• **Concentración**, al componer con una función tipo $f(y)=y^p$, con $p>1$. El efecto es que la función de pertenencia toma valores más pequeños, centrándose en los valores mayores.

El efecto de aplicar la concentración puede verse en la siguiente Fig. 2.2 (la función de pertenencia base es la azul, y la modificada la rosa):

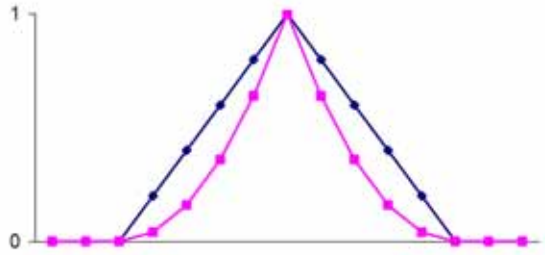

Fig. 2.2 Concentración

• **Dilatación**, al componer con una función tipo $f(y)=y^p$ con $0<p<1$ (o también con $2y-y^2$). El efecto es el contrario a la concentración Fig. 2.3.

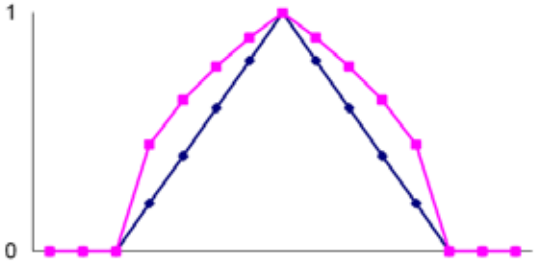

Fig. 2.3 Dilatación

• **Intensificación del contraste**. Se disminuyen los valores menores a 1/2 y se aumentan los mayores. Componemos con una función del tipo:

$$tipo: f(y) = \begin{cases} 2^{p-1} y^p & para: y \le 0.5 \\ 1 - 2^{p-1}(1-y)^p & en_otro_caso \end{cases}$$

Para p>1. Por lo general se suele usar p=2 (a mayor p, mayor intensificación) Fig. 2.4.

El efecto es:

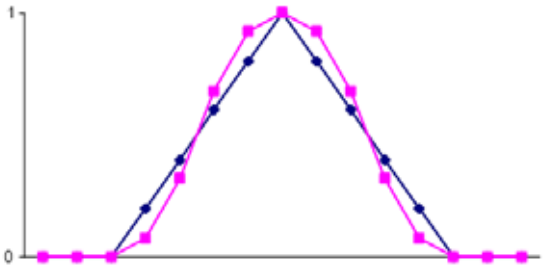

Fig. 2.4 Intensificación del contraste

• **Difuminación.** Efecto contrario al anterior Fig. 2.5.

Se compone con la función:

$$tipo: f(y) = \begin{cases} \sqrt{y/2} & para: y \le 0.5 \\ 1 - \sqrt{(1-y)/2} & en_otro_caso \end{cases}$$

Cuyo efecto es:

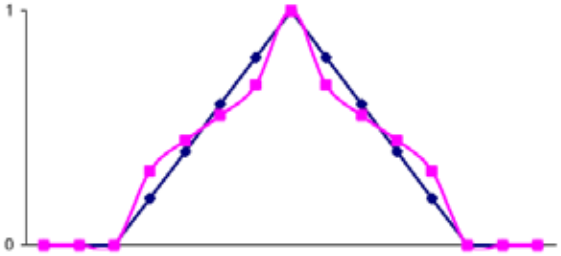

Fig. 2.5 Difuminación

Los adverbios o modificadores pueden componerse entre sí tabla 1.1, obteniendo múltiples combinaciones para representar enunciados complejos como "Juan es mucho más que alto". Existen varios modificadores predefinidos como son:

Nombre del modificador	**Descripción del modificador**
Not (no)	1-y
Very (muy)	y^2
Somewhat (algo)	$y^{1/3}$
More-or-less (mas o menos)	$y^{1/2}$
Extremly (extremadamente)	y^3

Tabla 1.1 Adverbios modificadores para lenguaje difuso.

Tipo de funciones de pertenencia o membresía

- Triangular: Definido por sus límites inferior a y superior b, y el valor modal m, tal que a<m<b.

$$A(x)=\begin{cases}0 & si \quad x\le a\\ (x-a)/(m-a) & si \quad x\in(a,m]\\ (b-x)/(b-m) & si \quad x\in(m,b)\\ 0 & si \quad x\ge b\end{cases}$$

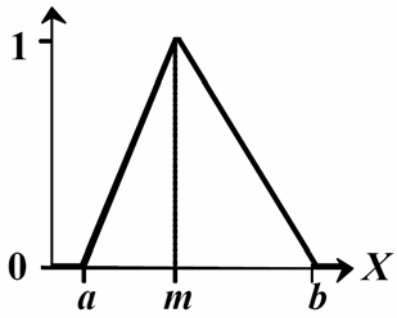

Fig. 2.6 Ecuación y Función de Pertenencia Triangular

- Función Γ (gamma): Definida por su límite inferior a y el valor k>0.

$$A(x)=\begin{cases}0 & si \quad x\le a\\ 1-e^{-k(x-a)^2} & si \quad x>a\end{cases}$$

$$A(x)=\begin{cases}0 & si \quad x\le a\\ \dfrac{k(x-a)^2}{1+k(x-a)^2} & si \quad x>a\end{cases}$$

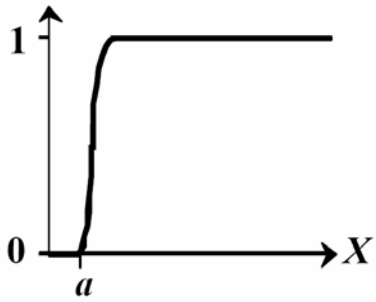

Fig. 2.7 Ecuación y Función de Pertenencia Gamma

- Esta función se caracteriza por un rápido crecimiento a partir de a.
- Cuanto mayor es el valor de k, el crecimiento es más rápido aún.
- La primera definición tiene un crecimiento más rápido.
- Nunca toman el valor 1, pero tiene una asíntota horizontal en 1.

Se aproximan linealmente por:

$$A(x)=\begin{cases} 0 & si & x\le a \\ (x-a)/(m-a) & si & x\in(a,m) \\ 1 & si & x\ge m \end{cases}$$

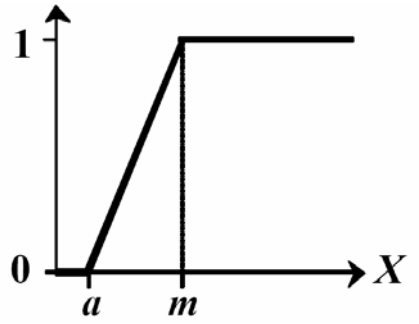

Fig. 2.8 Ecuación y Función de Pertenencia Gamma aproximación lineal

- Función S: Definida por sus límites inferior a y superior b, y el valor m, o punto de inflexión tal que a<m<b.

  - Un valor típico es: m=(a+b) / 2.
  - El crecimiento es más lento cuanto mayor sea la distancia a-b.

$$A(x)=\begin{cases} 0 & si & x\le a \\ 2\{(x-a)/(b-a)\}^2 & si & x\in(a,m] \\ 1-2\{(x-b)/(b-a)\} & si & x\in(m,b) \\ 1 & si & x\ge b \end{cases}$$

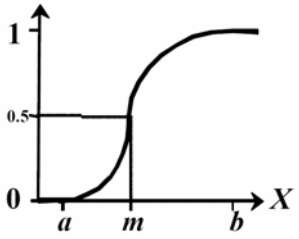

Fig. 2.9 Ecuación y Función de Pertenencia S

- Función Gaussiana: Definida por su valor medio m y el valor k>0.

$$A(x)=e^{-k(x-m)^2}$$

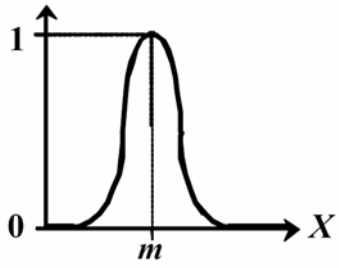

Fig. 2.10 Ecuación y Función de Pertenencia Gaussiana

- Es la típica campana de Gauss.
- Cuanto mayor es k, más estrecha es la campana.

- Función Trapezoidal: Definida por sus límites inferior a y superior d, y los límites de su soporte, b y c, inferior y superior respectivamente.

$$A(x)=\begin{cases} 0 & si \quad (x\le a)\vee(x\ge d) \\ (x-a)/(b-a) & si \quad x\in(a,b] \\ 1 & si \quad x\in(b,c) \\ (d-x)/(d-c) & si \quad x\in(c,d) \end{cases}$$

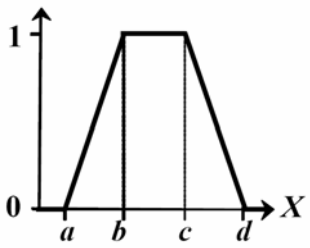

Fig. 2.11 Ecuación y Función de Pertenencia Trapezoidal

- Función Pseudo-Exponencial: Definida por su valor medio m y el valor k>1.

$$A(x)=\frac{1}{1+k(x-m)^2}$$

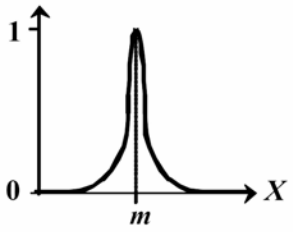

Fig. 2.12 Ecuación y Función de Pertenencia Pseudo-Exponencial

- Cuanto mayor es el valor de k, el crecimiento es más rápido aún y la "campana" es más estrecha.

- Función Trapecio Extendido: Definida por los cuatro valores de un trapecio [a, b, c, d], y una lista de puntos entre a y b, o entre c y d, con su valor de pertenencia asociado a cada uno de esos puntos.

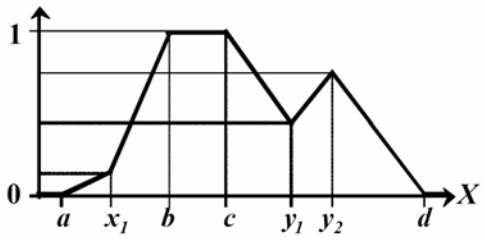

Fig. 2.13 Ecuación y Función de Pertenencia Trapecio Extendido

- En general, la función Trapezoidal se adapta bastante bien a la definición de cualquier concepto, con la ventaja de su fácil definición, representación y simplicidad de cálculos.
- En casos particulares, el Trapecio Extendido puede ser de gran utilidad. Éste permite gran expresividad aumentando su complejidad.
- En general, usar una función más compleja no añade mayor precisión, pues debemos recordar que se está definiendo un concepto difuso.

2.1.5 Operaciones entre conjuntos difusos

Los conjuntos difusos se pueden operar entre sí del mismo modo que los conjuntos clásicos. Puesto que los primeros son una generalización de los segundos, es posible definir las operaciones de intersección, unión y complemento haciendo uso de las mismas funciones de pertenencia:

- **t-norma del mínimo:** La función mín. ($\wedge$) es una t-norma, que corresponde a la operación de intersección en conjuntos crisp o clásicos cuyos grados de pertenencia están en el rango de [0,1]. Por eso, esta función es la extensión natural de la intersección en conjuntos difusos Fig. 2.14. La ecuación es la siguiente:

$$(A \cap B)(x) = A(x) \wedge B(x) = mín\{A(x), B(x)\}$$

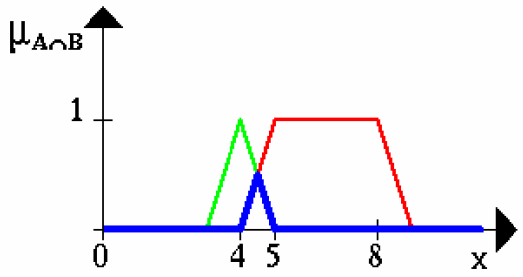

Fig. 2.14 Función min., T-norma o Intersección

- **t-conorma o s-norma del máximo:** La función máx. ($\vee$) es una s-norma, que corresponde a la operación de unión en conjuntos clásicos cuyos grados de pertenencia están en [0,1]. Por eso, esta función es la extensión natural de la unión en conjuntos difusos Fig. 2.15. La ecuación es la siguiente:

$$(A \cup B)(x) = A(x) \vee B(x) = máx\{A(x), B(x)\}$$

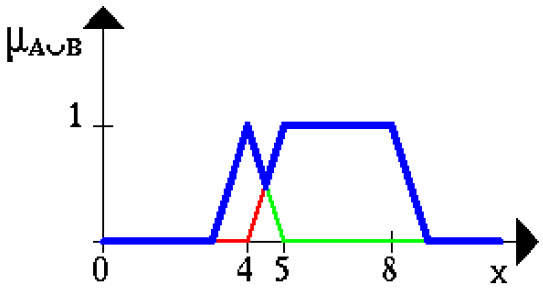

Fig. 2.15 Función máx., S-norma o Unión

- **Complemento:** La función complemento (~) en los conjuntos crisp es la siguiente, como existen dos únicos valores son 1 y 0 el complemento de 1 es 0 y el complemento de 0 es 1. En los conjuntos difusos su complemento es:

$$\overline{A}(x) = \neg A(x) = 1 - A(x)$$

Gráficamente se indica en la Fig. 2.16

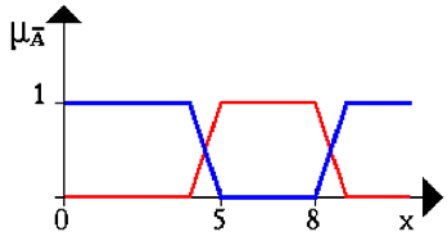

Fig. 2.16. Complemento

Las propiedades básicas de conjuntos son:

- Conmutativa: A U B = B U A; A ∩ B = B ∩ A;
- Asociativa: A U (B U C) = (A U B) U C = A U B U C;
  A ∩ (B ∩ C) = (A ∩ B) ∩ C = A ∩ B ∩ C;
- Idempotencia: A U A = A; A ∩ A = A;
- Distributiva: A U (B ∩ C) = (A U B) ∩ (A U C);
  A ∩ (B U C) = (A ∩ B) U (A ∩ C);
- Condiciones Frontera o Límite: A U Ø = A; A U X = X;
  A ∩ Ø =Ø; A ∩ X = A;
- Involución (doble negación): ¬(¬A) = A;
- Transitiva: A ⊂ B y B ⊂ C, implica A ⊂ C;

En realidad, estas expresiones son bastante arbitrarias y podrían haberse definido de muchas otras maneras. Esto obliga a considerar otras definiciones más generales para las operaciones entre los conjuntos difusos.

2.2 MODELOS DIFUSOS

2.2.1 Modelo lingüístico

Variable Lingüística (Linguistic Variable): Es una variable cuyos valores son palabras o sentencias (no números). A menudo se quiere describir el estado de un objeto o fenómeno, para ello se usa una variable cuyo enunciado realiza la descripción, también llamado etiqueta lingüística.
Ejemplo: Un valor difuso con etiqueta lingüística velocidad "rápida", pero que tan veloz es rápida. Si se da un valor crisp de 40 Km/h y tenemos un valor de 39.9Km/h ¿esta será menos rápida?

Se puede aplicar a fenómenos u objetos tales como Temperatura, Edad, Velocidad, etc.

Entonces un valor crisp es un punto del conjunto, mientras que en valores difusos una etiqueta lingüística es una colección de puntos (velocidades posibles).

Hay variables cuya definición es más compleja porque se mueven en dominios subyacentes poco claros y no es natural trasladarlos a valores numéricos: Limpieza, Sabiduría, Verdor, etc.

Lógica Clásica	Lógica Difusa
Valores de Verdad: V o F	Valores de Verdad: Conjunto Difuso
Predicados Precisos: Padre, Madre, etc.	Predicados Precisos e Imprecisos: (alto, flaco, etc.)
Dos cuantificadores: existe $\exists$, para todo $\forall$	Varios cuantificadores: mucho, poco, etc.
Un modificador: negación	Varios modificadores: muy, algo, etc.

Tabla 1.2 Diferencias entre Lógica Clásica y Lógica Difusa

2.2.2 Modelos difusos lingüísticos

Definición básica: Conjunto de reglas no rigurosas donde las variables lingüísticas de entrada y salida se representan por conjuntos difusos. Tiene 4 elementos básicos como son:

- Interfaz de fusificación
- Base de conocimiento
- Motor de inferencia
- Interfaz de defusificación

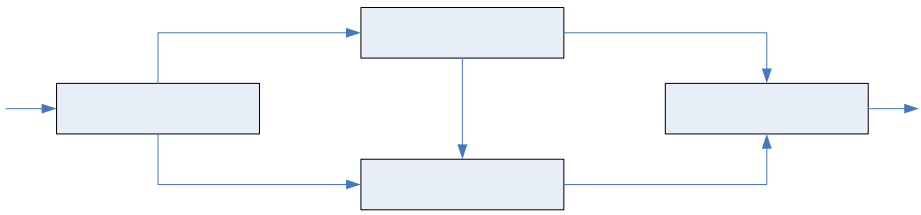

Fig. 2.17 Modelo Difuso

Interfaz de fusificación. Este elemento transforma las variables de entrada del modelo en variables difusas. Para esta interfaz se deben tener definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia.

Base de conocimientos. Contiene las reglas lingüísticas del control y la información referente a las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos. Estas reglas lingüísticas, tienen típicamente la siguiente forma:

Si tenemos los conjuntos difusos A y B entonces da como resultado C.

Interfaz de fusificación

Existen varias formas de derivar las reglas, entre las que se destacan las basadas en:

- La experiencia de expertos y el conocimiento de ingeniería de control. La base de reglas se determina a partir de entrevistas con el operador o a través del conocimiento de la dinámica del proceso.
- La modelación del proceso. Los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de datos de entrada y salida del proceso.

Motor de inferencia. Permite calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada, mediante las reglas del controlador y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida.

Interfaz de defusificación. Este elemento permite tener un vínculo entre las reglas difusas y la salida a controlar.

Existen diferentes métodos de defusificación, algunos de los cuales se describen a continuación:

- *Método del máximo.* La salida corresponde al valor para el cual la función de pertenencia alcanza su máximo.

- *Media del máximo.* La salida es el promedio entre los elementos del conjunto que tienen un grado de pertenencia máximo.

- *Centro de área.* Genera como salida el valor correspondiente al centro de gravedad de la función de pertenencia del conjunto de salida.

2.2.3 Modelo Takagi-Sugeno

Este modelo se caracteriza por relaciones basadas en reglas difusas, donde las premisas de cada regla representan subespacios difusos y las consecuencias son una relación lineal de entrada-salida (Takagi y Sugeno, 1995).

Las variables de entrada en las premisas de cada regla son relacionadas por operadores "y, and o ^" y la variable de salida es función de las variables de estado, en general, una función lineal.

Por lo tanto, las reglas del modelo tienen la siguiente forma:

R_i: Si X_i es Al_i ^…^ Xk es Ak_i

Entonces $Y_i = f_i(Xl,\ldots,Xk)$

Donde:

X1,..., Xk variables de entrada o premisas de las reglas
A1i,..., Aki conjuntos difusos asociados a las variables de entrada
$p_0^1,\ldots, p_k^i$ parámetros de la regla i
Y_i salida de la regla i
fi función que generalmente es lineal, es decir:

$$Yi = p_0^1 + p_1^i\, Xl + \ldots + p_k^i\, Xk$$

Por lo tanto, la salida del modelo, Y, se obtiene ponderando la salida de cada regla por su respectivo grado de cumplimiento Wi, es decir:

$$Y = \sum_{i=1}^{M} W_i Y_i \Big/ \sum_{i=1}^{M} W_i$$

Donde:

M → número de reglas del modelo
W_i → corresponde al grado de activación de la regla i.

Wi se define como:

$$w_i = oper(\mu_{Al_i},...,\mu_{Am_i},...,\mu_{Ak_i})$$

Donde:

"oper" → operador mínimo o el producto; y
μ_{Am_i} → grado de pertenencia de la variable de entrada Xm al conjunto difuso Am_i para m = 1, ..., k.

En particular, los modelos dinámicos de tiempo discreto de Takagi y Sugeno están dados por:

Ri: Si y(t-1) es Al_i ^…^ *y*(t-n*y*) es Any_i ^ u(t-1) es Bl_i ^…^u(t-nu) es Bnu_i

Entonces

$y_i(t) = a_1^i\, y(t-1) + \ldots + a_{ny}^i\, y(t-ny) + b_1^i\, u(t-1) + \ldots + b_{nu}^i\, u(t-nu) + c^i$

Donde:

a_j^i, b_j^i y c^i → parámetros de los modelos de las consecuencias.

También los modelos dinámicos de Takagi y Sugeno se pueden representar en variables de estado, es decir:

Si $x_1(t)$ es Al_i y…y $x_n(t)$ es An_i

Entonces

$x_i (t+1) = A^i x(t) + B^i u(t) + C^i$

Donde:

$x=[x_1,\ldots,x_n]$ → vector de variables de estado del proceso
A^i, B^i y C^i → matrices de los modelos lineales en variables de estado de las consecuencias.

2.3 ELEMENTOS ELECTRÓNICOS

2.3.1 Transformador de Corriente (TC)

El papel del transformador de corriente es proveer en el arrollamiento secundario una corriente proporcional a la corriente primaria que esta circulando por el equipo conectado a la red de Media Tensión para ser utilizado en las funciones de medición y protección.

Características generales. El transformador de corriente se compone de dos circuitos, el primario y el secundario, acoplados magnéticamente. Desde el punto de vista constructivo cuando el arrollamiento primario esta compuesto por un número de vueltas, el transformador es del tipo arrollamiento primario. Cuando el primario es un conductor simple que atraviesa al transformador, este puede ser del tipo barra primaria (integrada en el TC), tipo soporte (primario formado por un conductor sin aislar de la instalación como ser una barra) y tipo toroidal (el primario esta formado por un cable aislado de la instalación que atraviesa el TC).
A continuación se da los valores característicos que definen a los TC (según la norma IEC 60044) y algunas definiciones particulares que permitirán entender.

Relación de transformación. Generalmente se da como la relación entre la corriente primaria nominal y la corriente secundaria nominal:

$$Kn = \frac{Ipr}{Isr}$$

Por ejemplo 100/5 A, 60/5 A, etc.

Nivel de aislación nominal (Upr). Es la más alta tensión que puede aplicarse al primario del TC. Notar que la corriente primaria está relacionada con el nivel de tensión de MT y que uno de los terminales secundarios se conecta generalmente a tierra. En forma similar a otros equipamientos, se definen los siguientes valores: Tensión máxima resistida a frecuencia industrial durante 1 minuto Máxima tensión resistida de impulso

Ejemplo: para una tensión de 17,5kV nominales, el TC debe soportar 38kV durante 1 minuto a 50Hz y una tensión de impulso de 95kV.
En el caso especial de un TC toroidal el aislamiento dieléctrico es provista por el aislamiento del conductor que lo atraviesa.

Frecuencia nominal (fr). En la frecuencia de la instalación: 50Hz o 60Hz

Corriente de servicio (Ips) Es la corriente de operación del equipo (por ejemplo un transformador, un alimentador) y es la que define la corriente primaria de un TC (Ips). Para el cálculo de esta corriente deberá considerarse cualquier clase de desclasificación (si es aplicable) relacionado generalmente con el equipo o la instalación.

Corriente primaria nominal (Ipr). Este valor en general es siempre más grande o igual que la corriente de operación Ips de la instalación.

Los valores normalizados de corriente primaria son:

10 - 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 y sus múltiplos

Precisión (Accuracy). Es la relación en porcentaje, de la corrección que se haría para obtener una lectura verdadera. El ANSI C57.13-1968 designa la precisión para protecciones con dos letras C y T.

"C" significa que el porcentaje de error puede ser calculado, y esto se debe a que los devanados están uniformemente distribuidos, reduciendo el error producido por la dispersión del flujo en el núcleo.

"T" significa que debe ser determinado por medio de pruebas, ya que los devanados no están distribuidos uniformemente en el núcleo produciendo errores apreciables.

El número de clasificación indica el voltaje que se tendría en las terminales del secundario del TC para un burden definido, cuando la corriente del secundario sea 20 veces la corriente nominal, sin exceder 10% el error de relación.

Burden o Potencia Nominal de un Transformador de Corriente. Es la capacidad de carga que se puede conectar a un transformador, expresada en VA o en Ohms a un factor de potencia dado. El término "Burden" se utiliza para diferenciarlo de la carga de potencia del sistema eléctrico. El factor de potencia referenciado es el del burden y no el de la carga.

Polaridad. Las marcas de polaridad designan la dirección relativa instantánea de la corriente. En el mismo instante de tiempo que la corriente entra al terminal de alta tensión con la marca, la corriente secundaria correspondiente esta saliendo por el terminal marcado.

Capacidad de Corriente Continua. Es la capacidad de corriente que el TC puede manejar constantemente sin producir sobrecalentamiento y errores apreciables. Si la corriente del secundario de un transformador de corriente esta entre 3 y 4 Amps., cuando la corriente del primario esta a plena carga, se dice que el transformador esta bien seleccionado. No se recomienda sobre dimensionar los TC's porque el error es mayor para cargas bajas.

Capacidad de Corriente Térmica de Corto Tiempo. Esta es la máxima capacidad de corriente simétrica RMS que el transformador puede soportar por 1 seg., con el secundario en corto, sin sobrepasar la temperatura especificada en sus devanados. En la práctica esta se calcula como:
I Térmica (KA) = Potencia de Corto Circuito (MVA)/ (1.73* Tensión (KV)).

Como la potencia de precisión varía sensiblemente con el cuadrado del número de Ampere-Vueltas del primario, para un circuito magnético dado, la precisión de los TC's hechos para resistir grandes valores de corrientes de corto circuito, disminuye considerablemente

Capacidad Mecánica de Tiempo Corto. Esta es la máxima corriente RMS asimétrica en el primario que el TC puede soportar sin sufrir daños, con el secundario en corto. Esta capacidad solo se requiere definir en los TC tipo devanado. En la práctica esta corriente se calcula como:
I Dinámica (KA) = 2.54 * I Térmica

Bases generales para el diseño y selección de transformadores de corriente

La función de un transformador de corriente es la de reducir a valores normales y no peligrosos, las características de corriente en un sistema eléctrico, con el fin de permitir el empleo de aparatos de medición normalizados, por consiguiente más económicos y que pueden manipularse sin peligro.

Un transformador de corriente es un transformador de medición, donde la corriente secundaria está, dentro de las condiciones normales de operación, prácticamente proporcional a la corriente primaria, y desfasada de ella un ángulo cercano a cero, para un sentido apropiado de conexiones.

El primario de dicho transformador está conectado en serie con el circuito que se desea controlar, en tanto que el secundario está conectado a los circuitos de corriente de uno o varios aparatos de medición, relevadores o aparatos análogos, conectados en serie.

Un transformador de corriente puede tener uno o varios devanados secundarios embobinados sobre uno o varios circuitos magnéticos separados. Los factores que determinan la selección de los transformadores de corriente son:

- El tipo de Transformador de Corriente.
- El tipo de instalación.
- El tipo de aislamiento.
- La potencia nominal.
- La clase de precisión.
- El tipo de conexión.
- La Corriente Nominal Primaria.
- La Corriente Nominal Secundaria.

Tipo de Transformador de Corriente. Existen tres tipos de TC según su construcción:

Tipo devanado primario. Este como su nombre lo indica tiene mas de una vuelta en el primario. Los devanados primarios y secundarios están completamente aislados y ensamblados permanentemente a un núcleo laminado. Esta construcción permite mayor precisión para bajas relaciones.

Tipo Barra. Los devanados primarios y secundarios están completamente aislados y ensamblados permanentemente a un núcleo laminado. El devanado primario, consiste en un conductor tipo barra que pasa por la ventana de un núcleo.

Tipo Boquilla (Ventana o Bushing). El devanado secundario está completamente aislado y ensamblado permanentemente a un núcleo laminado. El conductor primario pasa a través del núcleo y actúa como devanado primario.

Tipo de Instalación. Los aparatos pueden ser construidos para ser usados en instalaciones interiores o exteriores. Generalmente, por razones de economía, las instalaciones de baja y media tensión, hasta 25 KV., son diseñadas para servicio interior.

Las instalaciones de tipo exteriores son de tensiones desde 34.5 KV a 400 KV., salvo en los casos donde, por condiciones particulares se hacen instalaciones interiores para tensiones hasta 230 KV. Es conveniente examinar además, el tipo de TC que se pueda instalar, dependiendo de las facilidades de mantenimiento.

Tipo de Aislamiento. Los materiales que se utilizan. para el aislamiento dependen del voltaje del sistema al que se va a conectar, la tensión nominal de aislamiento debe ser al menos igual a la tensión mas elevada del sistema en que se utilice. Los tipos de aislamiento se dividen en tres clases:

Material para baja tensión. Generalmente los TC's son construidos con aislamiento en aire o resina sintética, suponiéndose que lo común son las instalaciones interiores.

Material de media tensión. Los transformadores para instalaciones interiores (tensión de 3 a 25 KV) son construidos con aislamiento de aceite con envolvente de porcelana (diseño antiguo), o con resina sintética (diseño moderno).

Hay que hacer notar que la mayoría de los diseños actuales emplean el material seco, los aparatos con aislamiento en aceite o masa aislante (compound) se utilizan muy poco y sólo para instalaciones existentes.

Los aparatos para instalaciones exteriores son generalmente construidos con aislamiento porcelana-aceite, aunque la técnica más moderna está realizando ya aislamientos en seco para este tipo de transformadores.

Materiales para alta tensión. Los transformadores para alta tensión son aislados con papel dieléctrico, impregnados con aceite y colocados en una envolvente de porcelana.

Es importante definir la altitud de la instalación sobre el nivel del mar, ya que las propiedades dieléctricas de los materiales y del aire disminuyen con la altitud. Normalmente todos los equipos se diseñan para trabajar hasta 1000 Mts sobre el nivel del mar, si la altitud es mayor el nivel de aislamiento debe ser mayor.

2.3.2 Transformador de Potencial

Es un transformador devanado especialmente, con un primario de alto voltaje y un secundario de baja tensión. Tiene una potencia nominal muy baja y su único objetivo es suministrar una muestra de voltaje del sistema de potencia, para que se mida con instrumentos incorporados.

Además, puesto que el objetivo principal es el muestreo de voltaje deberá ser particularmente preciso como para no distorsionar los valores verdaderos. Se pueden conseguir transformadores de potencial de varios niveles de precisión, dependiendo de que tan precisas deban ser sus lecturas, para cada aplicación especial.

El enrollado primario de un transformador de potencial se conecta en paralelo con el circuito de potencia y en el secundario se conectan los instrumentos o aparatos de protección.

Estos transformadores se construyen para todas las tensiones de circuitos normalizados. Normalmente son de tipo seco o moldeado para tensiones inferiores a 23 KV y en baño de líquido para tensiones superiores.

Errores en los transformadores de potencial

En los transformadores de potencial existen 2 tipos de errores que afectan a la precisión de las medidas hechas con transformadores de potencial.

Error de relación: Es la diferencia entre la relación verdadera entre la tensión del primario y secundario y la relación indicada en la placa característica.

Error de ángulo: Es la diferencia en la posición de la tensión aplicada a la carga secundaria y la tensión aplicada al devanado primario. El error de ángulo se representa con el símbolo (g), está expresado en minutos y se define como positivo cuando la tensión aplicada a la carga, desde el terminal secundario marcado al no marcado, está adelantada respecto a la tensión aplicada al primario desde el terminal marcado al no marcado.

Clasificación de los errores.

En el transformador de potencial interesa que los errores en la relación de transformación y los errores de ángulo entre tensión primaria y secundaria se mantengan dentro de ciertos limites.

Esto se obtiene sobredimensionando tanto el núcleo magnético como la sección de los conductores de los enrollados.

La magnitud de los errores depende de la característica de la carga secundaria que se conecta al transformador de potencial. Para su clasificación desde el punto de vista de la precisión (error máximo en la relación de transformación).

Las diversas normas sobre transformador de potencial exigen que los errores se mantengan dentro de ciertos valores para determinadas características de la carga.

Norma Americana ASA

Estas normas han clasificado características de precisión de los transformadores para el servicio con aparatos de medición. La clase y limites de precisión definidas por norma ASA, pueden observarse en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2

Designación de la carga	Volt amperes secundarios	Factor de potencia de la carga
W	12.5	0.1
X	25	0.7
Y	75	0.85
Z	200	0.85
ZZ	400	0.85

Tabla 2.1: Carga normalizada para transformadores de potencial

Clase de precisión	Límites del factor de corrección del transformador		Límites del factor de potencia de la carga medida (en retardo)	
	Mínimo	*Máximo*	*Mínimo*	*Máximo*
1.2	0.988	1.012	0.6	1
0.6	0.994	1.006	0.6	1
0.3	0.997	1.003	0.6	1

Tabla 2.2: Límites del factor de corrección del transformador de potencial

Finalmente con esta normalización los transformadores de potencial se designan por la clase de precisión y la letra correspondiente a la carga normalizada para la cual se garantiza la precisión.

En un transformador designado 0,6W, el error máximo de la relación de transformación no sobrepasa un 0,6% de la razón nominal, con un factor de potencia 0,1 y al variar la tensión entre 10% más y 10% menos de la nominal.

Norma Alemana VDE

Esta norma VDE, normaliza para cada clase de precisión, la capacidad de los enrollados del transformador de potencial en VA.

Las clases de precisión son 3-1-0,5-0,2-0,1 y ella debe mantenerse para cuando el voltaje primario no varíe más allá del 20% sobre su tensión nominal, excepto en los de clase 3 en que se garantiza solo para su tensión nominal

Clase de exactitud	Rango de voltaje Primario	Error máximo de voltaje	Error máximo de fase
0.1	0.8 - 1.2 Vn	± 0.1%	± 5min
0.2	0.8 - 1.2 Vn	± 0.2%	± 10min
0.5	0.8 - 1.2 Vn	± 0.3%	± 20min
1	0.8 - 1.2 Vn	± 1.0%	± 40min
3	1.0 Vn	± 3.0%	

Tabla 2.3: Errores máximos admisibles para transformadores de potencial

Con respecto al voltaje secundario nominal están normalizados en la Norma ASA (Tabla 2.4) y Norma VDE (Tabla 2.5)

Norma ASA	
115 V	120 V
66.4 V	69.5 V

Tabla 2.4: Voltaje secundario nominal Norma ASA

Norma VDE	
110 V	115 V
110/Ö 3 V	115/Ö 3 V
110/3 V	115/3 V

Tabla 2.5: Voltaje secundario nominal Norma VDE

Conexiones trifásicas

Para conectar transformadores de potencial en forma trifásica se usan dos tipos de conexiones usualmente, estas son:

Conexión estrella-estrella: Se utiliza cuando se requiere neutro en el secundario.

Conexión en V: Esta conexión se utiliza cuando no se requiere neutro secundario, es más económica ya que. se requiere solo dos transformadores de potencial.

Características particulares de los transformadores de tensión

Estos se conectan en derivación, entre fases (en tensiones bajas y medias) o entre fase y tierra cualquiera sea la tensión.

La conexión fase tierra es muy útil, ya que entrega tensiones que permiten reconstruir tanto las tensiones simples como las compuestas, mientras que las tensiones obtenidas de las conexiones fase fase no permiten reconstruir las tensiones fase tierra, y bajo circunstancias especiales (por ejemplo

cuando se desea conocer el contenido armónico) es importante poder conocer las tensiones simples.

En ciertos casos se considera como mas económica la solución con dos transformadores conectados en V, aunque esto es cierto la economía no debe buscarse en diseños que generan posibles dificultades futuras de trabajo.

Es mas lógico que el esfuerzo económico se haga en otras direcciones (quizás cuestionándose si no es posible realizar menos puntos de medición, pero los que se hacen deben ofrecer solución a todo problema que pueda aparecer).

Los transformadores de tensión funcionan prácticamente a tensión constante, a inducción constante, y no presentan efectos de saturación tan notables como los transformadores de corriente.

La tensión nominal primaria coincide con la tensión nominal del sistema, o si conectados fase tierra será la tensión nominal del sistema sobre raíz de 3.

La prestación del transformador no esta condicionada a la carga que efectivamente se alimentara. Debe observarse que en cambio la precisión de la medida puede ser afectada por los cables de conexión (sección y longitud) y la corriente que por ellos circula, cantidad de aparatos que alimentan.

Es entonces conveniente separar los circuitos por sus funciones en un lugar próximo al núcleo. Como en la red se pueden presentar condiciones de sobretensión en relación al estado del neutro de la red, y la presencia de fallas, el transformador debe soportar estas situaciones.

Factor de tensión es la relación respecto de la tensión nominal primaria, del valor mas elevado de tensión con el cual se pretende que el transformador satisfaga prescripciones de calentamiento, y otras eventuales prescripciones.

Esta característica esta asociada al tiempo de funcionamiento (limitado o no) y se selecciona teniendo en cuenta la forma de conexión del arrollamiento primario y la condición del neutro de la red.

Para transformadores conectados fase-fase este factor es 1.2, para transformadores que se conectan fase tierra en redes con neutro aislado se requiere 1.9 por 8 horas, si la falla se elimina en tiempo breve en cambio 30 segundos. Otras características tenemos:

- Relación de transformación.
- Prestación.
- Sobretensiones permanentes, fallas.
- Transformadores de tipo inductivo y capacitivo.
- Caída en los cables, error.
- Aprovechamiento para algún servicio auxiliar.

2.3.3 Capacitores

Los capacitores o condensadores son elementos lineales y pasivos que pueden almacenar y liberar energía basándose en fenómenos relacionados con campos eléctricos.

Básicamente, todo capacitor se construye enfrentando dos placas conductoras. El medio que las separa se denomina dieléctrico y es un factor determinante en el valor de la capacidad resultante.

Además de depender del dieléctrico, la capacidad es directamente proporcional a la superficie de las placas e inversamente proporcional a la distancia de separación.

Símbolos

Fig. 2.18 Símbolos de Condensadores

Nota: al implementar circuitos, no olvidar respetar las indicaciones de los terminales en los capacitores polarizados para evitar su destrucción.

Modelo Equivalente

Los capacitores ideales no disipan energía como lo hacen los resistores. En cambio, los capacitores reales normalmente presentan una resistencia asociada en paralelo Fig. 2.19. Esta resistencia proporciona una trayectoria de conducción entre placas.

Es a través de esta resistencia que el capacitor se descarga lentamente. A continuación figura un modelo práctico (simplificado) de capacitor.

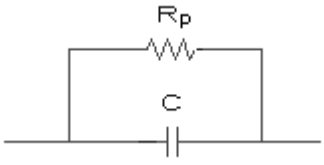

Fig. 2.19 Modelo de Capacitor Real

Rp representa las pérdidas dieléctricas, cuyo valor ronda los 100Mohms (excepto en los capacitores electrolíticos donde es mucho menor). Un modelo más completo contempla además una resistencia (Rs) y un inductor (L) en serie con el circuito anterior. Rs representa las pérdidas en los conductores y L representa la inductancia propia del capacitor más la de los conductores.

La botella de Leyden, uno de los capacitores más simples, almacena una carga eléctrica que puede liberarse, o descargarse, juntando sus terminales, mediante una varilla conductora. La primera botella de Leyden se fabricó alrededor de 1745, y todavía se utiliza en experimentos de laboratorio.

Para un capacitor se define su capacidad como la razón de la carga que posee uno de los conductores a la diferencia de potencial entre ambos, es decir, la capacidad es proporcional al la carga e inversamente proporcional a la diferencia de potencial:

$C = Q/V$, medida en Farad (F).

La diferencia de potencial entre estas placas es igual a: $V = E * d$, ya que depende de la intensidad de campo eléctrico y la distancia que separa las placas.

También: $V = q/(\varepsilon * d)$, siendo q carga por unidad de superficie y d la diferencia entre ellas. Para un capacitor de placas paralelas de superficie S por placa, el valor de la carga en cada una de ellas es $q*S$ y la capacidad del dispositivo:

$$C = q * S/(q * d/\varepsilon) = \varepsilon * S/d$$

donde:

$d \rightarrow$ separación entre las placas.

S → superficie de las placas
q → carga por unidad de superficie
ε → valor del dielectrico

La energía acumulada en un capacitor será igual al trabajo realizado para transportar las cargas de una placa a la otra venciendo la diferencia de potencial existente ellas:

$$\Delta W = V * \Delta q = (q/C) * D * q$$

La energía electrostática almacenada en el capacitor será igual a la suma de todos estos trabajos desde el momento en que la carga es igual a cero hasta llegar a un valor dado de la misma, al que llamaremos Q.

$$W = V * dq = (1/c) * (q * dq) = (Q^2/C)$$

Si ponemos la carga en función de la tensión y capacidad, la expresión de la energía almacenada en un capacitor será:

$W = (C * V^2)/2$, medida en unidades de trabajo.

Dependiendo de superficie o área de las placas su fórmula de capacidad es:

$C = \varepsilon * A / 4\pi d$, donde ε es la constante dieléctrica.

donde:

W → Energía almacenada por el condensador.
C → Valor de capacitancia
V → Voltaje aplicado
A → Área de la placas del condensador
Q → Carga del condensador

Clasificación

Según su dieléctrico:

- aire
- mica
- papel
- cerámico
- plástico (KS: styroflex, dieléctrico de poliestireno y láminas de metal. KP: dieléctrico de polipropileno y láminas de metal. MKP: dieléctrico de polipropileno y armaduras de metal vaporizado. MKY: dieléctrico de polipropileno de gran calidad y láminas de metal vaporizado. MKT: dieléctrico de poliéster y láminas de metal vaporizado. MKC: dieléctrico de policarbonato y láminas de metal vaporizado.
- vidrio / cuarzo
- óxidos (electrolíticos de aluminio y electrolíticos de tantalio).

Según la polaridad admitida: polarizados y no polarizados.

Según la característica de su valor: fijos, variables y ajustables.

Según su montaje en el circuito: de inserción y montaje superficial.

Codificación

IRAM recomienda el uso de las letras p, n, m, m y F para representar, respectivamente, los coeficientes multiplicadores 10^{-12}, 10^{-9}, 10^{-6}, 10^{-3} y 1 que figuran en el valor de la capacitancia expresada en Faradays.

Sin embargo, en general, la codificación depende del tipo de capacitor.

Valores Estándares

Según Norma IRAM 4083 (diciembre 1975), la cual se corresponde con la recomendación de la International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional) IEC 63/67 - Preferred numbers series for resistors and capacitors y con la recomendación de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas COPANT-R 260/1 1971-Resistores y capacitores fijos de uso electrónico-valores preferidos.

Series

Los fabricantes de capacitores venden su producto en series definidas por su tolerancia (tabla 2.6). Las series para estos son:

E24: se emplea para tolerancias de ± 5% y se compone de valores redondeados de los números teóricos $10^{(n/24)}$; donde $0 \leq n \leq 23$.
E12: T = ± 10% y fórmula $10^{(n/12)}$; donde $0 \leq n \leq 11$.
E6: T = ± 20% y fórmula $10^{(n/6)}$; donde $0 \leq n \leq 5$.

±5 % (E24)	±10 % (E12)	±20 % (E6)
10	10	10
11		
12	12	
13		
15	15	15
16		
18	18	
20		
22	22	22
24		
27	27	
30		
33	33	33
36		
39	39	
43		
47	47	47
51		
56	56	
62		
68	68	68
75		
82	82	
91		

Tabla 2.6 Tolerancia de Capacitores

Criterios de Selección

A continuación se enumeran las características técnicas que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar los capacitores para una determinada aplicación.

- Valor capacitivo
- Tolerancia
- Tensión máxima de trabajo
- Frecuencia de resonancia propia
- Factor de potencia
- Factor de disipación
- Coeficiente de temperatura
- Resistencia equivalente en serie
- Resistencia de aislación
- Inductancia parásita
- Rigidez dieléctrica
- Absorción del dieléctrico
- Tensión de formación (para electrolíticos de aluminio) * importante

Consideraciones Prácticas

Tensión máxima de trabajo: al sobrepasar la tensión nominal (más precisamente la tensión de prueba, la cual es superior a la tensión nominal) se perfora el dieléctrico, produciéndose un cortocircuito entre placas que inutiliza el capacitor. Tener en cuenta que, generalmente, esta tensión disminuye al aumentar la frecuencia de la tensión aplicada. Esta información se encuentra en las hojas de datos provistas por los respectivos fabricantes.

Polaridad: algunos capacitores sólo admiten determinada polaridad (como los electrolíticos polarizados) y si se les aplica la opuesta, se destruyen.

Prueba: la mejor manera de comprobar la funcionalidad de un capacitor es medir su valor de capacitancia con un instrumento adecuado para tal fin. Si no se cuenta con uno, se puede emplear un óhmetro para medir la resistencia entre terminales. Aunque esta prueba no es exhaustiva, una lectura de pocos ohms indica un capacitor defectuoso. En un capacitor polarizado, sus polaridades deben coincidir con las del óhmetro.

IMPORTANTE: al realizar estas mediciones, el capacitor debe estar ¡descargado!

¿Dónde instalar los capacitores?

Para la instalación de los capacitores deberán tomarse en cuenta diversos factores que influyen en su ubicación como lo son: La variación y distribución de cargas, el factor de carga, tipo de motores, uniformidad en la distribución de la carga, la disposición y longitud de los circuitos y la naturaleza del voltaje.

Se puede hacer una corrección del grupo de cargas conectando en los transformadores primarios y secundarios de la planta, por ejemplo, en un dispositivo principal de distribución o en una barra conductora de control de motores.

La corrección de grupo es necesaria cuando las cargas cambian radicalmente entre alimentadores y cuando los voltajes del motor son bajos, como por ejemplo, 230 V.

Cuando los flujos de potencia cambian frecuentemente entre diversos sitios de la planta y cargas individuales, se hace necesario efectuar la corrección primero en una parte de la planta, verificar las condiciones obtenidas y después compensar en la otra. Sin embargo, es más ventajoso usar un capacitor de grupo ubicado lo más equidistante que se pueda de las cargas.

Esto permite la desconexión de una parte de los capacitores de acuerdo a condiciones específicas de cargas variables.

Cuando la longitud de los alimentadores es considerable, se recomienda la instalación de capacitores individuales a los motores, por supuesto se necesitarán varios condensadores de diferentes capacidades, resultando esto en un costo mayor.

Sin embargo deberá evaluarse el beneficio económico obtenido con la compensación individual. Considerando que el costo de los capacitores para bajos voltajes es más del doble que los de altos voltajes. Por esto, cuando el voltaje de los circuitos de motores es de 230 V, es más económico usar una instalación de grupo si es que ésta se puede efectuar en el primario a 2.400 ó 4.160 V.

Debemos también considerar que, cuando los capacitores se instalan antes del banco principal de transformadores, éstos no se benefician y no se alivia su carga en KVA. Esta es una buena razón para usar capacitores de 230 V a pesar de su alto costo.

Correcciones aisladas

La corrección aislada del factor de potencia se debe hacer conectando los capacitares tan cerca como sea posible de la carga o de las terminales de los alimentadores. Debe recordar que la corrección se lleva a cabo sólo del punto considerado a la fuente de energía y no en dirección opuesta.

Los capacitores instalados cerca de las cargas pueden dejar de operar automáticamente cuando las cargas cesan, incrementan el voltaje y por ende el rendimiento del motor

¿Cómo determinar la cantidad de condensadores necesarios?

Midiendo la energía activa y reactiva en instalaciones ya existentes se puede calcular la potencia necesaria del condensador para obtener el factor de potencia deseado. También se pueden conectar durante cierto tiempo registradores de la potencia activa y reactiva para obtener información sobre el consumo de energía reactiva. Si se desea alcanzar un valor determinado del factor de potencia $\cos\varphi_2$ en una instalación cuyo factor de potencia existente $\cos\varphi_1$ se desconoce, se determina este con ayuda de un contador de energía activa, un amperímetro y un voltímetro. Existen diferentes métodos para realizar estas mediciones.

Cuando se van a realizar estudios del factor de potencia, es imprescindible contar con suficiente cantidad de datos, o en su defecto tomarlos en las instalaciones. Si el estudio es solo para propósitos de disminución tarifaria, es suficiente con la información de su factura para determinar los KVAR requeridos. A partir de los valores de los KWH y los KVARH se determina el factor de potencia:

$$tg\varphi_1 = \frac{KVArH}{KWH}$$

Correspondiente a este valor de $tg\varphi_1$ hay un valor de $\cos\varphi_1$ y se desea tener un $\cos\varphi_2$ que equivale a $tg\varphi_2$.

$KVAR_{originales} = KW * tg\varphi_1$, $KVAR_{mejorado} = KW * tg\varphi_2$

Luego los KVAR necesarios para mejorar el factor de potencia son:

$$\Delta KVAr = KW * \left(tg\varphi_1 - tg\varphi_2\right)$$

En la tabla 2.7 se indican los valores de $(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$ para un amplio rango de condiciones de operación y un factor F.

tgfi	F.P. Inicial	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
2.24	0.40	1.557	1.671	1.805	1.832	1.861	1.895	1.924	1.959	1.998	2.037	2.085	2.146	2.288
2.22	0.41	1.474	1.605	1.742	1.769	1.798	1.831	1.860	1.896	1.935	1.973	2.021	2.082	2.225
2.16	0.42	1.413	1.541	1.681	1.709	1.738	1.771	1.800	1.836	1.874	1.913	1.961	2.022	2.164
2.10	0.43	1.356	1.480	1.624	1.651	1.680	1.713	1.742	1.778	1.816	1.855	1.903	1.964	2.107
2.03	0.44	1.290	1.421	1.558	1.585	1.614	1.647	1.677	1.712	1.751	1.790	1.837	1.899	2.041
1.98	0.45	1.230	1.365	1.501	1.532	1.561	1.592	1.626	1.659	1.695	1.737	1.784	1.846	1.988
1.93	0.46	1.179	1.310	1.446	1.473	1.502	1.533	1.657	1.600	1.636	1.677	1.725	1.786	1.929
1.88	0.47	1.130	1.258	1.397	1.425	1.454	1.485	1.519	1.532	1.588	1.629	1.677	1.758	1.881
1.82	0.48	1.076	1.208	1.343	1.370	1.400	1.430	1.464	1.497	1.534	1.575	1.623	1.684	1.826
1.77	0.49	1.030	1.159	1.297	1.326	1.355	1.386	1.420	1.453	1.489	1.530	1.578	1.639	1.782
1.73	0.50	0.982	1.112	1.248	1.276	1.303	1.337	1.369	1.403	1.441	1.481	1.529	1.590	1.732
1.68	0.51	0.936	1.067	1.202	1.230	1.257	1.291	1.323	1.357	1.395	1.435	1.483	1.544	1.686
1.64	0.52	0.894	1.023	1.160	1.188	1.215	1.249	1.281	1.315	1.353	1.393	1.441	1.502	1.644
1.60	0.53	0.850	0.980	1.116	1.144	1.171	1.205	1.237	1.271	1.309	1.349	1.397	1.458	1.600
1.55	0.54	0.809	0.939	1.075	1.103	1.130	1.164	1.196	1.230	1.268	1.308	1.356	1.417	1.559
1.51	0.55	0.769	0.899	1.035	1.063	1.090	1.124	1.156	1.190	1.228	1.268	1.316	1.377	1.519
1.47	0.56	0.730	0.860	0.996	1.024	1.051	1.085	1.117	1.151	1.189	1.229	1.277	1.338	1.480
1.44	0.57	0.692	0.822	0.958	0.986	1.013	1.047	1.079	1.113	1.151	1.191	1.239	1.300	1.442
1.40	0.58	0.665	0.785	0.921	0.949	0.976	1.010	1.042	1.076	1.114	1.154	1.202	1.263	1.405
1.36	0.59	0.618	0.748	0.884	0.912	0.939	0.973	1.005	1.039	1.077	1.117	1.165	1.226	1.368
1.33	0.60	0.584	0.714	0.849	0.878	0.905	0.939	0.971	1.005	1.043	1.083	1.131	1.192	1.334
1.30	0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.870	0.904	0.936	0.970	1.008	1.048	1.096	1.157	1.299
1.26	0.62	0.515	0.645	0.781	0.809	0.836	0.870	0.902	0.936	0.974	1.014	1.062	1.123	1.265
1.23	0.63	0.483	0.613	0.749	0.777	0.804	0.838	0.870	0.904	0.942	0.982	1.030	1.091	1.233
1.20	0.64	0.450	0.580	0.716	0.744	0.771	0.805	0.837	0.871	0.909	0.949	0.997	1.058	1.200
1.17	0.65	0.419	0.549	0.685	0.713	0.740	0.774	0.806	0.840	0.878	0.918	0.966	1.007	1.169
1.14	0.66	0.388	0.518	0.654	0.682	0.709	0.743	0.775	0.809	0.847	0.887	0.935	0.996	1.138
1.11	0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.679	0.713	0.745	0.779	0.817	0.857	0.905	0.966	1.108
1.08	0.68	0.329	0.459	0.595	0.623	0.650	0.684	0.716	0.750	0.788	0.828	0.876	0.937	1.079
1.05	0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.620	0.654	0.686	0.720	0.758	0.798	0.840	0.907	1.049
1.02	0.70	0.270	0.400	0.536	0.564	0.591	0.625	0.657	0.691	0.729	0.769	0.811	0.878	1.020
0.99	0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.563	0.597	0.629	0.663	0.701	0.741	0.783	0.850	0.992
0.96	0.72	0.213	0.343	0.479	0.507	0.534	0.568	0.600	0.634	0.672	0.712	0.754	0.821	0.963
0.93	0.73	0.186	0.316	0.452	0.480	0.507	0.541	0.573	0.607	0.645	0.685	0.727	0.794	0.936
0.90	0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.480	0.514	0.546	0.580	0.618	0.658	0.700	0.767	0.909
0.88	0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.453	0.487	0.519	0.553	0.591	0.631	0.673	0.740	0.882
0.85	0.76	0.105	0.235	0.371	0.399	0.426	0.460	0.492	0.526	0.564	0.604	0.652	0.713	0.855
0.82	0.77	0.079	0.209	0.345	0.373	0.400	0.434	0.466	0.500	0.538	0.578	0.620	0.687	0.829
0.80	0.78	0.053	0.183	0.319	0.347	0.374	0.408	0.440	0.474	0.512	0.552	0.594	0.661	0.803
0.77	0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.347	0.381	0.413	0.447	0.485	0.525	0.567	0.634	0.776
0.75	0.80	-	0.130	0.266	0.294	0.321	0.355	0.387	0.421	0.459	0.499	0.541	0.608	0.750
0.72	0.81	-	0.104	0.240	0.268	0.295	0.329	0.361	0.395	0.433	0.473	0.515	0.582	0.724
0.69	0.82	-	0.078	0.214	0.242	0.269	0.303	0.335	0.369	0.407	0.447	0.489	0.556	0.698
0.67	0.83	-	0.52	0.188	0.216	0.243	0.277	0.309	0.343	0.381	0.421	0.463	0.530	0.672
0.64	0.84	-	0.026	0.162	0.190	0.217	0.251	0.283	0.317	0.355	0.395	0.437	0.504	0.645
0.62	0.85	-	-	0.136	0.164	0.191	0.225	0.257	0.291	0.329	0.369	0.417	0.478	0.620
0.59	0.86	-	-	0.109	0.140	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.343	0.390	0.450	0.593
0.57	0.87	-	-	0.083	0.114	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.317	0.364	0.424	0.567
0.54	0.88	-	-	0.054	0.085	0.112	0.143	0.175	0.209	0.246	0.288	0.335	0.395	0.538

0.50	0.89	-	-	0.028	0.059	0.086	0.117	0.149	0.183	0.230	0.262	0.309	0.369	0.512
0.48	0.90	-	-	-	0.031	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.234	0.281	0.341	0.484
0.46	0.91	-	-	-	-	0.030	0.060	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456
0.43	0.92	-	-	-	-	-	0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.284	0.426
0.40	0.93	-	-	-	-	-	-	0.032	0.067	0.104	0.145	0.192	0.253	0.395
0.36	0.94	-	-	-	-	-	-	-	0.034	0.071	0.112	0.160	0.220	0.363
0.33	0.95	-	-	-	-	-	-	-	-	0.037	0.078	0.126	0.186	0.329
0.29	0.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.041	0.089	0.149	0.292
0.25	0.97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.048	0.108	0.251
0.20	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.061	0.203
0.14	0.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.142
0.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 2.7 Factor para determinar la potencia reactiva capacitiva necesaria para corregir el factor de potencia.

En tal caso, la potencia del condensador necesaria es:

$$\Delta KVAr = KW * F$$

Se eligen los condensadores en los rangos existentes normalizados hasta completar la magnitud exacta inmediata superior.

Es oportuno destacar que en relación a los voltajes y tamaños de los condensadores, las diferentes fábricas producen equipos para los voltajes normalizados más utilizados por las empresas de electricidad, aunque también los fabrican para voltajes y tamaños especiales bajo especificación del cliente.

Sin embargo, los tamaños existentes Tabla 2.8 en el mercado son muy numerosos y generalmente se fabrican tanto condensadores monofásicos como trifásico en incrementos de 5KVAR hasta 50KVAR, de 10KVAR hasta 100KVAR y en saldos de 50KVAR hasta 300KVAR. Tamaños mayores requieren pedidos especiales (Anexo A).

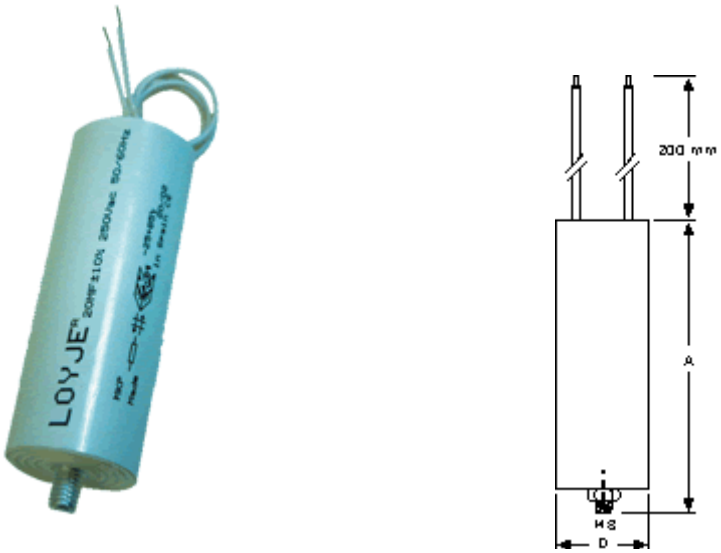

Fig. 2.20 Capacitores para corrección del Factor de Potencia

Capacidad±10%µF	Voltios Red 50-60 Hz	Embalaje Unidades	Dimensiones mm.		
			A	C	D
2,5	250	50	62	---	26
4	250	50	62	---	26
4,5	250	50	62	---	26
5	250	50	62	---	26
6	250	50	62	---	26
7	250	50	62	---	26
8	250	50	80	---	31
10	250	25	80	---	31
12	250	25	80	---	31
13	250	25	80	---	31
14	250	25	105	---	36
18	250	25	105	---	36
20	250	25	105	---	36
25	250	25	100	---	41
28	250	25	100	---	41
30	250	25	100	---	41
32	250	25	100	---	41
36	250	25	100	---	41
45	250	25	100	---	41
50	250	25	100	---	41

Tabla 2.8 Capacidad de los condensadores y sus dimensiones

Normas: EN61048, EN61049

En todo caso es importante destacar que la frecuencia de operación de los condensadores debe ser 60Hz.

Aún contando con la información de la factura, es deseable realizar mediciones preferentemente de KW, KVAR y voltaje tanto en circuitos alimentadores principales como en las cargas (en intervalos regulares de tiempo durante los períodos de operación de la planta), lo que nos permitiría diferenciar entre una compensación a nivel de planta una compensación para cargas individuales o una combinación de éstas.

Las mediciones de voltaje son muy importantes si se desea utilizar un control automático de regulación de condensadores.

Nota: Generalmente cada fábrica de condensadores produce determinado tamaño y para algunos voltajes. Lo mejor a la hora de la selección es solicitar los catálogos de las diferentes fábricas a fin de obtener el más conveniente para su tamaño y voltaje de operación.

2.4 FACTOR DE POTENCIA

2.4.1 Factor de Potencia de Desplazamiento (DPF)

Las cargas industriales en su naturaleza eléctrica son de carácter reactivo, a causa de la presencia principalmente de equipos de refrigeración, motores, etc. Este carácter reactivo obliga que junto a la potencia activa (KW) exista una potencia llamada Reactiva (KVAR), las cuales en su conjunto determinen el comportamiento operacional de dichos equipos y motores. Esta potencia reactiva ha sido tradicionalmente suministrada por las empresas de electricidad, aunque puede ser suministrada por las propias industrias. Al ser suministrada por las empresas de electricidad deberá ser producida y transportada por las redes, ocasionando necesidades de inversión en capacidades mayores de los equipos y redes de transporte. Todas estas cargas industriales necesitan de corrientes reactivas para su

operación. La naturaleza de esas corrientes es descrita a continuación, mostrándose que son la causa principal del bajo factor de potencia.

Potencia Aparente

La potencia aparente es sencillamente definida como el producto del voltaje aplicado a un circuito y la corriente que circula por él. Esta es medida en Voltios-Amperios e incluye cualquier potencia reactiva que puede ser requerida por la carga.

Potencia Activa

La potencia activa en vatios consumida por una carga eléctrica, es el producto de la corriente de la carga, el voltaje aplicado y el coseno del ángulo de fase, θ, esto es:

Potencia(vatios)=voltios*amperios*cosθ

El coseno del ángulo de fase toma en cuenta la potencia reactiva. Ella aparece en la ecuación debido a que cualquier inductancia o capacitancia causa una diferencia de tiempo entre el pico del voltaje aplicado a la carga y el pico de corriente exigido por la carga. La figura 2.21 ilustra una carga puramente inductiva.

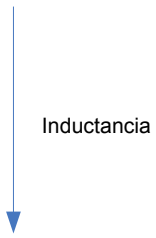

Fig. 2.21 Carga Pura Inductiva

En circuitos inductivos, el pico del voltaje ocurre primero, y la corriente se dice que está "atrasada". En circuitos capacitivos, el pico de corriente ocurre primero y la corriente se dice que está "adelantada" Fig. 2.22

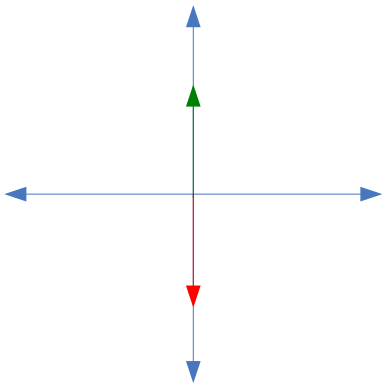

Fig. 2.22 Corriente Inductiva y Capacitiva

Tanto el adelanto como el atraso es medido en grados y estos grados es lo que se denomina ángulo de fase θ, y así, θ es un ángulo de atraso de 90˚. Como la mayoría de las cargas industriales son de naturaleza inductiva, normalmente se trabajará con corrientes atrasadas.

En circuitos resistivos puros (sin inductancia ni capacitancia), los picos de corrientes y voltaje ocurren simultáneamente y se dice que están "en fase". Aquí el ángulo θ será siempre 0˚. En circuitos que contienen resistencia e inductancia, el ángulo θ es siempre menor de 90˚.

El hecho de que grandes inductancias produzcan grandes atrasos es matemáticamente reflejado por el valor del coseno, ya que el coseno de cualquier ángulo entre 0˚ y 90˚ está entre los valores de 1 y 0 respectivamente. Cuando esa θ = 0˚ (circuito resistivo puro) cos θ=1, obteniéndose:

Potencia Activa (vatios)=voltios*amperios*1, en cuyo caso la potencia activa y la aparente son iguales. Cuando θ=90˚ (circuito inductivo puro o capacitivo puro), cos θ=0 y la potencia activa (vatios)=voltios*amperios*0=0.

Para un ejemplo práctico, sea θ=30˚. De las tablas trigonométricas, cos30˚=0.866, luego potencia activa (Vatios)=voltios*amperios*0.866.

Este es un caso típico donde la potencia activa es mucho mayor que 0, pero considerablemente menor que el producto voltios*amperios; la diferencia es debida a la potencia reactiva.

Se deduce lógicamente que la adición de más motores (esto es, más inductancia) a una planta industrial disminuirá el factor de potencia de la industria. Esto es debido a que:

$$Factor_de_Potencia = \frac{Potencia_Activa}{Potencia_Aparente}$$

Cuando el ángulo de fase es incrementado por la adición de más inductancias, la fracción representada cos θ ser hace mαs pequeña, dando una cifra baja para el factor de potencia.

Consideremos el triángulo rectángulo de la figura 2.23 que representa las corrientes requerida por un grupo de motores de inducción.

Fig. 2.23 Factor de Potencia (cosθ) casi 1

En la figura 2.23, la potencia reactiva es pequeña Q, y se ve fácilmente que el lado del triángulo que representa la potencia activa se aproxima en tamaño al lado que representa la potencia aparente así, la razón de la potencia activa a la potencia aparente (cos θ) se aproxima a uno. Note que en este caso, el ángulo θ es pequeño, como también lo es el lado que representa la potencia reactiva.

En la figura 2.24, el número de motores en el grupo original se incrementado. Ahora, el ángulo θ también ha aumentado y también lo han hecho los lados que representan las potencias activa y reactiva, y por lo tanto la potencia aparente se ha hecho relativamente mayor. Luego, la razón de la potencia activa a la aparente (cos θ) decrece y así mismo disminuye el factor de potencia, causando los efectos indeseables que se describen a lo largo de este trabajo.

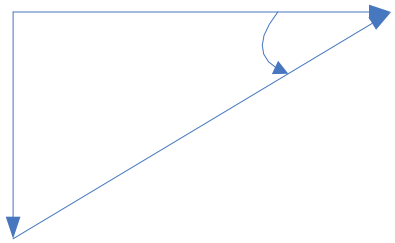

Fig. 2.24 Disminuye el Factor de Potencia (cosθ)

Normalmente, la potencia activa es expresada en Kilovatios (Kw.), la potencia reactiva en Kilovatios amperios reactivos (KVAR) y la potencia aparente en Kilovatios amperios (KVA) igualmente, se abrevias el factor de potencia como FP o cos θ. Del triángulo rectángulo, podemos deducir lo siguiente:

$$FP = \cos\theta = \frac{KW}{\sqrt{KW^2 + KVAR^2}}$$

Observándose la importancia que tiene el lograr disminuir lo más posible la cifra que representa los KVAR.

¿Por qué existe un bajo factor de potencia?

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

- Un gran número de motores.
- Presencia de equipos de refrigeración y aire acondicionado.
- Una sub-utilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos, por una mala planificación y operación en el sistema eléctrico de la industria.
- Un mal estado físico de la red eléctrica y de los equipos de la industria.
- Una carga eléctrica industrial en su naturaleza física es reactiva, pero su componente de reactividad puede ser controlado y compensado, con amplios beneficios técnicos y económicos.

2.4.2 Conceptos básicos sobre armónicas

2.4.2.1 Análisis de Fourier

La serie de Fourier de una señal o función periódica x (t) tiene la expresión:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n sen\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)\right)$$

donde:

T → período de la función

n → orden de la armónica

a_0 → valor medio de la función

a_n, b_n → coeficientes de las series, amplitudes de las componentes rectangulares

El vector armónico correspondiente es:

$$A_n < \Phi_n = a_n + jb_n$$

con la magnitud:

$$A_n = \sqrt{a_n{}^2 + b_n{}^2}$$

Y el ángulo de fase:

$$\Phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

Considerando la frecuencia f [Hz] y la frecuencia angular ω definida por:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Los coeficientes de Fourier se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t)d(\omega t)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t)\cos(\omega t)d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t)sen(\omega t)d(\omega t)$$

Ejemplo:

Cálculo de las armónicas de una señal cuadrada Fig. 2.25.

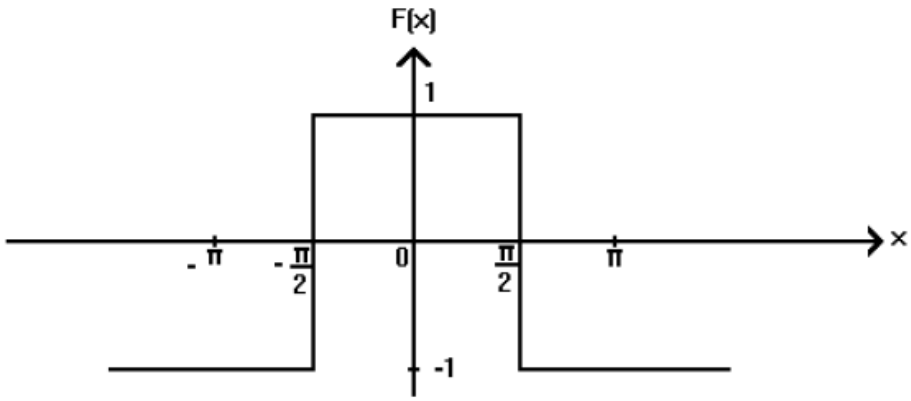

Fig. 2.25 Señal cuadrada.

En esta señal se cumplen

$a_0 = 0$

$b_n = 0$

$$a_1 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} F(\theta)\cos n\theta d\theta$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi}\left[\int_{-\pi}^{-\pi/2} -\cos\theta d\theta + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta d\theta + \int_{\pi/2}^{\pi} -\cos n\theta d\theta\right] = \frac{4}{\pi}$$

Evaluando los restantes coeficientes se obtiene:

$$F(\omega t) = \frac{4}{\pi}\left[\cos(\omega t) - \frac{1}{3}\cos(3\omega t) + \frac{1}{5}\cos(5\omega t) - \frac{1}{7}\cos(7\omega t) + ...\right]$$

La señal cuadrada tiene 33% de 3º armónica, 20% de 5º armónica, etc. El correspondiente espectro de frecuencias se observa en la figura 2.26.

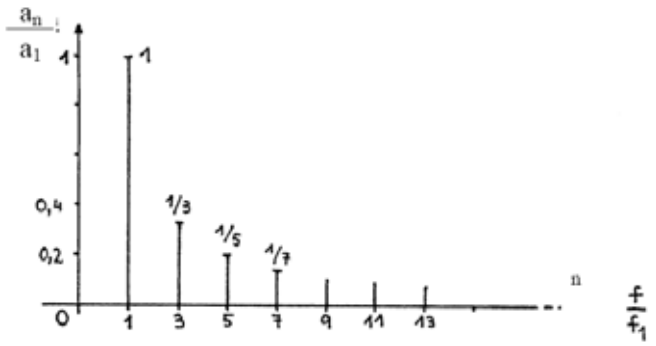

Fig. 2.26. Espectro de frecuencias de la señal cuadrada.

La figura 2.27. muestra la reconstitución de la señal cuadrada a partir de las armónicas

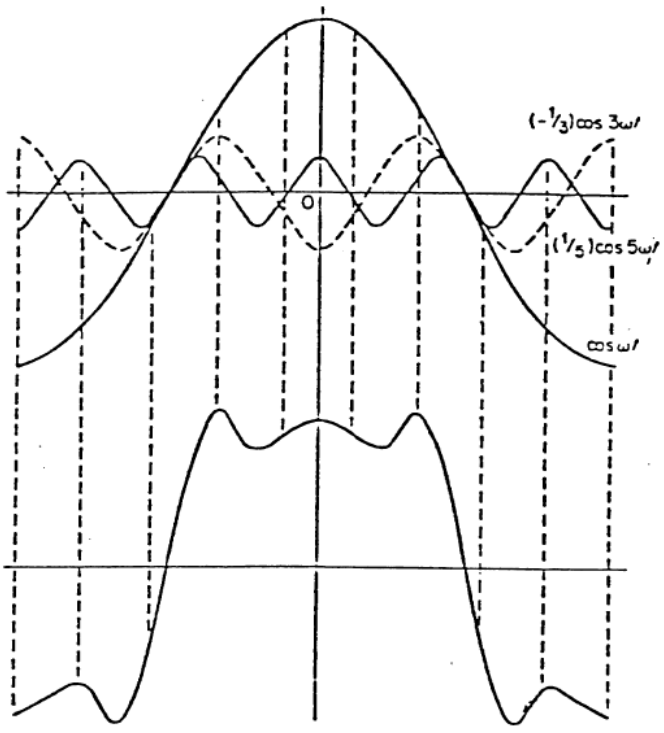

Fig.2.27: Reconstitución de una señal cuadrada.

2.4.2.2 Factor de potencia y potencia reactiva en redes con armónicas

En redes con voltajes y corrientes sinusoidales, estas variables tienen el comportamiento mostrado en la figura 2.28.

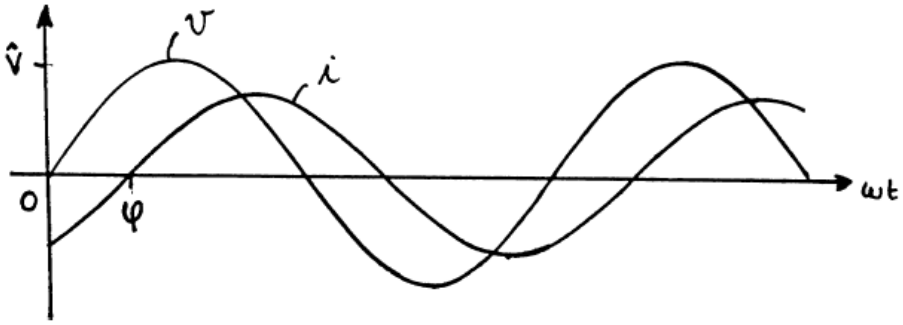

Fig. 2.28. Voltaje y Corriente Sinusoidales

En régimen sinusoidal valen las siguientes definiciones para DPF:

- Potencia activa:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)i(t)dt = V_{ef} I_{ef} \cos\varphi$$

donde:

V_{ef} → Valor efectivo de voltaje.
I_{ef} → Valor efectivo de corriente.
T → período de las variables.

- Potencia reactiva:

$$Q = V_{ef} I_{ef} sen\varphi$$

- Potencia aparente:

$$S = V_{ef} I_{ef}$$

- Factor de potencia:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\varphi$$

donde:

φ → ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente.

Relación entre potencias:

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

En la actualidad es muy común encontrar que la redes eléctricas tienen voltajes esencialmente sinusoidales (con distorsión pequeña), junto con corrientes altamente no sinusoidales. En la figura 2.29 se muestra una red con un voltaje sinusoidal junto con una corriente rectangular, situación que se tiene en la entrada de un rectificador puente monofásico controlado con filtrado ideal.

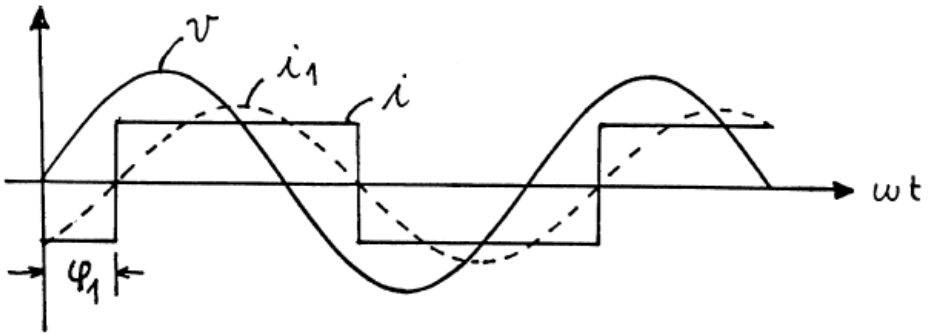

Fig.2.29 Corriente no Sinusoidal

En la figura 2.29, i es la corriente no sinusoidal demandada por el rectificador. La corriente i_1 es la componente fundamental de la corriente i y φ_1 corresponde al ángulo entre el voltaje v y la corriente i_1.

En estas condiciones valen las siguientes definiciones:

- Potencia activa:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T v * i * dt = V_{ef} I_{1ef} \cos\varphi_1$$

Esta ecuación muestra que las armónicas no contribuyen a la transferencia de energía, solamente aumentan las pérdidas.

- Potencia reactiva fundamental:

$$Q = V_{ef} I_{1ef} sen\varphi_1$$

- Potencia aparente:

$$S = V_{ef} I_{1ef}$$

- Corriente efectiva:

$$I_{ef} = \sqrt{I_{1ef}{}^2 + I_{2ef}{}^2 + I_{3ef}{}^2 + ... + I_{nef}{}^2}$$

donde:

I_{kef} (k = 1, 2,....n) → valor efectivo de la armónica k-ésima.

- Potencia aparente:

$$S = V_{ef} I_{1ef} = V_{ef} \sqrt{I_{1ef}{}^2 + I_{2ef}{}^2 + I_{3ef}{}^2 + ... + I_{nef}{}^2}$$

- Potencia reactiva se define como:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Expandiendo términos se obtiene:

$$Q = \sqrt{V_{ef}{}^2 \left(I_{1ef}{}^2 + I_{2ef}{}^2 + I_{3ef}{}^2 + ... + I_{nef}{}^2\right) - \left(V_{ef} I_{1ef} \cos\varphi_1\right)^2}$$
$$= \sqrt{V_{ef}{}^2 \left(I_{2ef}{}^2 + I_{3ef}{}^2 + ... + I_{nef}{}^2\right) + \left(V_{ef} I_{1ef} sen\varphi_1\right)^2}$$

donde se aprecia que la potencia reactiva Q tiene 2 componentes:

a) La potencia reactiva fundamental Q_1
b) La potencia reactiva de distorsión D, definida en base a:

$$D = V_{ef} \sqrt{I_{2ef}{}^2 + I_{3ef}{}^2 + ... + I_{nef}{}^2}$$

Con estas definiciones se obtienen las siguientes relaciones:

$$Q = \sqrt{Q_1{}^2 + D^2}$$
$$S = \sqrt{P^2 + Q_1{}^2 + D^2}$$

Esta última ecuación muestra que la circulación de corrientes armónicas provoca una sobrecarga de la red (aumenta S), sin aumentar la energía útil (potencia activa P).

Otra variable útil es el contenido de señal fundamental g, definida en base a la expresión.

$$g = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}} = \frac{I_{1ef}}{\sqrt{I_{1ef}{}^2 + I_{2ef}{}^2 + I_{3ef}{}^2 + ... + I_{nef}{}^2}}$$

Esta variable expresa el grado de distorsión de una señal. Cuando la señal es sinusoidal g = 1 y a medida que aumenta la distorsión el valor de g disminuye.

Con esta nueva definición se obtiene la relación

$$P = V_{ef}\left(I_{ef}\, g\right)\cos\varphi_1 = Sg\cos\varphi_1$$

El factor de potencia en redes no sinusoidales (FP) se define como:

$$FP = \frac{P}{S} = g\cos\varphi_1$$

En esta ecuación se aprecia que el factor de potencia está influenciado por el desfasamiento entre corriente y voltaje y por la distorsión de las corrientes. El término $\cos\varphi_1$ es conocido también como Factor de Desplazamiento, porque da una medida del desplazamiento entre el voltaje y la corriente.

2.4.2.3 Factores de distorsión

Distorsión Individual de Voltajes:

$$D_{Vh} = \frac{V_h}{V_1} * 100[\%]$$

donde:

V_h = amplitud o valor efectivo de la armónica h-ésima
V_1 = amplitud o valor efectivo de la fundamental

Distorsión Individual de Corrientes:

$$D_{Ih} = \frac{I_h}{I_1} * 100[\%]$$

Distorsión Total de Voltajes:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} V_h^{\,2}}}{V_1} * 100[\%]$$

Distorsión Total de Corrientes:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^{\,2}}}{I_1} * 100[\%]$$

La distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion, THD) da una medida del grado de distorsión de la variable. En una señal sinusoidal THD=0. En cambio, a medida que aumentan las armónicas, aumenta el valor del THD.

2.4.2.4 Origen de los armónicos.

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo θ respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc. Otro tipo de cargas tales como: reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc., también inyectan armónicos. El resto de las cargas tienen un comportamiento lineal y no generan armónicos inductancias, resistencias y condensadores.

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia.

Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en estrella-estrella con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra. Diodos, elementos semiconductores y transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos. Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia. Para entender esto más fácilmente mencionaremos algunos conceptos previos. Se ha representado la variación de la impedancia de una inductancia, así como la capacitancia. La fórmula que determina dicha función es la siguiente:

$$X_L = 2\pi fL \qquad X_C = -\frac{1}{2\pi fC}$$

O sea, a una determinada frecuencia pueden tener una impedancia constante pero su impedancia varía en función de la frecuencia, ejemplo 3 W a 60 ciclos, 5 W a 120 ciclos, etc., Filtros eléctricos y electrónicos, servomecanismos de motores, variadores de velocidad de motores tienen estas características. Estos tipos de elementos no generan armónicos si son energizados con una tensión de una sola frecuencia, sin embargo, si distorsionan la entrada, si existe más de una frecuencia y pueden alterar el contenido de armónicos. Estos elementos pueden mitigar o incrementar el problema del contenido de armónicos. Las dos categorías de equipos generadores de armónicos, pueden originar una interacción compleja en la cual la energía de los armónicos es transformada o multiplicada de una frecuencia a otra.

En la tabla 2.9 y tabla 2.10 se indican los elementos generadores de armónicos más comunes. En determinadas circunstancias la sobrecarga o daño de equipos pueden ser la causa de generación de armónicos. La gran cantidad de los armónicos en la mayoría de los sistemas de potencia son generados por los equipos de los usuarios.

Convertidores de AC-DC	Elementos magnéticos saturables
Hornos de arco AC-DC	Capacitares en paralelo
Balastros de lámparas fluorescentes	Variadores de velocidad de motores
Motores de inducción sobrecargados	Oscilaciones de baja frecuencia
Convertidores multifase	Problemas de neutro
	Capacitores serie
	Corriente de Inrush
	Transformadores estrella-estrella

Tabla 2.9. Fuentes de frecuencia armónicas

Controladores de velocidad	Convertidores de frecuencia
Motores de inducción de doble alimentación.	Motor generador mal puesto a tierra.

Tabla 2.10. Fuentes de frecuencia no armónicas

Los usuarios residenciales, comerciales e industriales, tienen una gran cantidad de equipos como hornos de microondas, computadoras, sistemas con control robótico, televisión, VCR, estéreos y otros equipos. Todos estos equipos contribuyen con la generación de cantidades variables de armónicos. Aún ventiladores eléctricos y simples motores de inducción trabajando sobrecargados pueden contribuir a la creación de armónicos.

Las salidas de armónicos de estos múltiples aparatos pueden sumarse y originar problemas en el sistema de potencia.

Los sistemas de iluminación del tipo lámparas de descarga o lámparas fluorescentes son generadores de armónicos de corriente. Una tasa del 25 % del tercer armónico es observada en ciertos casos. La tasa individual del armónico 3ro puede incluso sobrepasar el 100 % para ciertas lámparas fluocompactadas modernas, y por tanto hay que prestar una atención especial en el cálculo de la sección y la protección del neutro, ya que este conduce la suma de las corrientes de tercera armónica de las tres fases, por lo que puede ser sometido a peligrosos sobrecalentamientos si no es seleccionado adecuadamente.

La impedancia de un reactor saturado está variando con la circulación de corriente a través de ella, resultando en una considerable distorsión de corriente.

Este es el caso por ejemplo de transformadores sin carga sometidos a un sobrevoltaje continuo.

Las máquinas rotativas producen armónicos de ranura de rango elevado y de amplitud normalmente despreciable. Las pequeñas máquinas sincrónicas son sin embargo, generadoras de tensiones armónicas de 3er orden que pueden tener una incidencia sobre:

- El calentamiento permanente (aun sin defecto) de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores.
- El funcionamiento de los relés amperimétricos de protección contra los defectos de aislamiento.
- Los armónicos son atenuados de una manera normal a medida que la potencia eléctrica es adsorbida. En raros casos pueden contribuir a la potencia real que toma un motor pero es muy raro y no presentan ningún efecto positivo, en general los armónicos producen calor a medida que circulan por los conductores y aparatos eléctricos. Por otro lado cuando los armónicos se combinan con armónicos generados por diferentes fuentes, pueden propagarse a diferentes distancias.

  La tabla 2.11 muestra algunos elementos eléctricos generadores de armónicos y el espectro de corriente inyectado por los mismos.

tipo de carga	armónicos generados	comentarios
transformador	orden par e impar	componente en CC
motor asíncrono	orden impar	inter y subarmónicos
lámpara descarga	3° + impares	puede llegar al 30 % de I1
soldadura arco	3°	
hornos arco CA	espectro variable inestable	no lineal-asimétrico
rectificadores con filtro inductivo	h = K × P ± 1 Ih = I1/h	SAI-variadores V
rectificadores con filtro capacitivo	h = K × P ± 1 Ih = I1/h	alimentación equipos electrónicos
cicloconvertidores	variables	variadores V
reguladores PWM	variables	SAI-convertidor CC-CA

Tabla 2.11. Receptores y espectro de corrientes armónicas inyectadas por diferentes cargas.

2.5 TECNICAS DE MITIGACIÒN DE ARMÓNICOS

Existen técnicas usadas para reducir o, más preciso, para controlar el flujo de corriente armónicos de cargas no-lineales en sistemas industriales y comerciales. Estos son los siguientes:

2.5.1 Uso de Filtros Shunt

2.5.2 Uso de conversores estáticos de potencia Multipulso.

2.5.1 Filtros Shunt

Filtros Shunt es el método común que más se usa en el flujo de corrientes armónicas. Ellos se diseñan como una serie de combinaciones de inductores y capacitores. El filtro shunt también es referido como una "trampa" porque absorbe la corriente armónicos los cuales son suavizados.

El más común diseño de filtros shunt es un filtro suavizado simple. La frecuencia resonante es dada por la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_1\sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

donde:

f_0 es la frecuencia resonante

L es la inductancia del filtro

C es la capacitancia del filtro

X_C es la reactancia capacitiva del filtro

X_L es la reactancia inductiva del filtro

f_1 es la frecuencia fundamental

El valor de resistencia R determina la calidad del factor Q del filtro y es igual a la relación de la reactancia inductiva y capacitiva. Los valores típicos de rango Q va

desde 15 a 80 para filtros usados en aplicaciones industriales y comerciales. Filtros de bajo voltaje (480 y 600V) usan núcleos de acero huecos los cuales tienen muchas perdidas y tiene valores bajos de Q en el fin. Filtros de medio voltaje (4.16 y 13.8 KV) tienen valores de Q en el rango alto. La relación de X/R de rangos de sistemas de bajo voltaje de 3 a 7 y así no tengan alta amplificación en condiciones de resonancia paralelo. Aunque los filtros de bajo voltaje tienen muchas perdidas por unidad, ellos también proporcionan más flujo para oscilación que puede estar presente.

El proceso de diseñar un filtro shunt es un compromiso entre varios factores. En sistemas industriales y comerciales no es necesario considerar por muchos de los factores que son importantes en largas instalaciones útiles que usan filtros para transmisión HDVC y SVC (compensador estático var). Los factores que son importantes, sin embargo, son de bajo mantenimiento, económicos y fiables. Los más simples diseños de filtros que hacen el trabajo es el mejor.

Los pasos para el diseño de un filtro es como sigue:

a) Escoge el valor de capacitancia necesitada para mejorar el factor de potencia para eliminar alguna penalidad. Este es usualmente de 0.92.
b) Seleccione un reactor a la sintonía serie del condensador al deseado armónico. Éste normalmente es el quinto armónico en sistema donde la fuente de corriente armónica es de los conversor de potencia estático. En aplicaciones de horno de arco, el múltiple filtro sintonizado-simple son usados.
c) Calcule el pico de voltaje a través del capacitor y la corriente total rms en el reactor.
d) Escoge componentes estándar para encontrar la adecuada que se pone en ellos.

2.5.2 Conversores Estáticos de Potencia Multipulso.

Los armónicos pueden ser reducidos por multiplicación de fase. Por ejemplo, si m secciones de un rectificador de seis pulsos:

- Tiene la misma relación de transformación.
- Tiene transformadores con impedancias idénticas

- Son fases cambiantes exactamente 60/m grados de cada otro
- Son controladores en exactamente el mismo ángulo de retraso.
- Comparten igual corriente de carga.

Entonces los armónicos solamente presentan serian de la siguiente orden:

$$h = kq \pm 1$$

Donde:

h → orden del armónico
q → valor igual a 6m
m → número de rectificadores de seis pulsos
k → número entero (1, 2, 3, 4, …)

Una sección de dos rectificadores no son idénticos en todos estos aspectos; por consiguiente, en practica, las no características armónicas siempre estarán presentes para los grados que por encima de los requerimientos no son conocidos.

Cancelación de armónicos por inyección de armónicos.

La corriente de armónicos puede ser reducida o cancelada por inyección de corriente equivalente que esta de fase cambiada 180º. Esta técnica, la cual es llamada filtrado activo, ha siso usado en el laboratorio pero ya no es practico en un medio ambiente industrial.

En esta tesis se usa el filtro shunt ac, los cuales son normalmente del tipo LC, como muestra la figura 2.30. Normalmente, el diseño del filtro requiere determinar la magnitud y frecuencia de los armónicos.

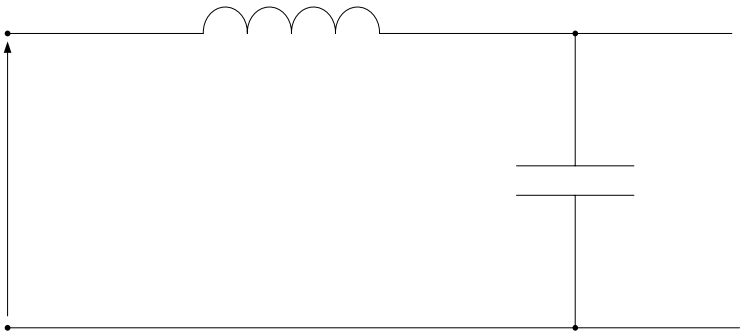

Fig. 2.30 Filtro Shunt pasivo LC

El circuito equivalente para la componente armónica n-esima es mostrada en la figura 2.31. El valor rms del n-esimo armónico aparece en el abastecimiento es obtenido por al usar la regla divisora de corriente.

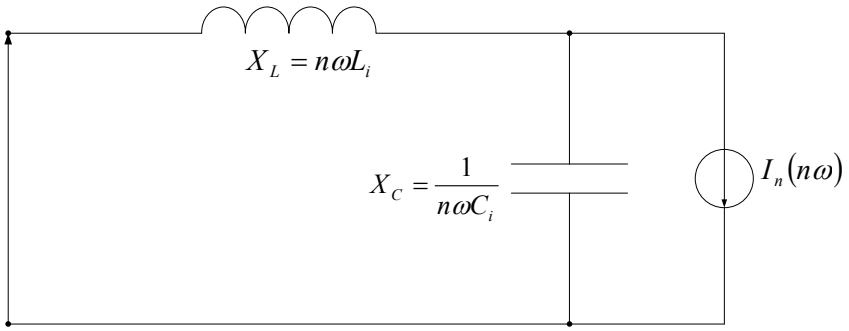

Fig. 2.31 Circuito equivalente para la componente armónica n-esima.

$$I_{sn} = \frac{1/n\omega C_i}{n\omega L_i - 1/n\omega C_i} I_n = \frac{1}{(n\omega)^2 L_i C_i - 1} I_n$$

Donde In es el valor rms de la n-sima corriente armónica. La cantidad total de la corriente armónica es

$$I_h = \left(\sum_{n=2,3,\ldots}^{\infty} I^2{}_{sn} \right)^{1/2}$$

Y el factor armónico de corriente de entrada (con filtro) es

$$r = \frac{I_h}{I_{s1}} = \left[\sum_{n=2,3,\ldots}^{\infty} \left(\frac{I_{sn}}{I_1} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$r^2 = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_{sn}}{I_1} \right)^2 = \sum \frac{1}{n^2 \left[(n\omega)^2 L_i C_i - 1 \right]^2}$$

$$f_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}$$

El filtro ac es generalmente sintonizado para envolver a la frecuencia de los armónicos, pero esto requiere un diseño cuidadoso para evitar la posibilidad de resonancia con el sistema de potencia.

2.6 INTERFACES DE PUERTOS DE MÁQUINA CON DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

2.6.1 Análisis de herramientas de conexión

La comunicación de datos es la transferencia de información de un punto a otro. Los datos se refieren específicamente con comunicación digital de datos. En este contexto "datos" se refiere a la información que es representada por una secuencia de ceros y unos, la misma clase de datos manejados por computadores.

Muchos sistemas de comunicaciones manejan datos análogos, un ejemplo son el sistema de teléfonos, radio y televisión. La instrumentación moderna es casi enteramente involucrada con la transferencia digital de datos.

Algunos sistemas de comunicaciones requieren un transmisor para enviar información, un receptor para aceptar esto y un vínculo entres los dos. Los tipos de vínculos abarcan: alambre de cobre, fibra óptica, radio y micro onda.

Algunos vínculos (links) usan conexión paralela, significa que varios alambres son requeridos para llevar una señal. Esta clase de conexión esta limitada por dispositivos como impresoras locales.

Virtualmente toda comunicación de datos moderna utiliza un vínculo serial, en las cuales los datos son transmitidos en secuencia sobre un circuito simple.

El dato digital es muchas veces transferido usando un sistema que es principalmente diseñado para comunicación análoga. Un MODEM, por ejemplo, trabaja usando flujo de datos digitales para modular una señal análoga que es enviada encima de una línea telefónica.

El receptor, demodula con otro MODEM la señal para reproducir el dato digital original. La palabra MODEM viene de MOdulador y DEModulador.

Debe haber acuerdo mutuo sobre como los datos son codificados, que es, el receptor puede ser habilitado para entender que le envía el transmisor. La estructura en los cuales los dispositivos se comunican es conocida como un protocolo.

2.6.2 Hardware adecuado para la interacción de dispositivos.

Estándares Físicos.

EIA-232 Estándar de Interfase.

Este estándar es publicado en los Estados Unidos en 1969 para definir los detalles eléctricos y mecánicos de la interfase entre el Equipo Terminal de Datos (sus siglas en ingles DTE Data Terminal Equipment) y el Equipo de Comunicación de Datos (sus siglas en inglés DCE Data Communications Equipment) los cuales emplean intercambio serial de datos binarios.

En comunicación de datos serial el sistema de comunicación puede consistir de:

- El DTE, un Terminal de envío de datos como un computador, el cual es la fuente de datos (usualmente una serie de código de caracteres en una apropiada forma digital).
- El DCE, el cual actúa como un convertidor de datos (como un MODEM) para convertir la señal en una forma apropiada de vínculo de comunicación de señales análogas para el sistema de teléfonos.
- El mismo vínculo (link) de comunicación, por ejemplo, un sistema de teléfonos.
- Un apropiado terminal receptor, como un modem, además un DCE, los cuales convierten la señal análoga a una forma apropiada de recepción del terminal.
- Un terminal receptor de datos, como una impresora, también un DTE, los cuales reciben los pulsos digitales para decodificar en una serie de caracteres.

La Figura 2.32 ilustra el flujo de señal a través de un simple vínculo de comunicación serial de datos.

Fig 2.32: flujo de señal de un simple vínculo de comunicación serial de datos.

Transmisión de datos

El EIA-232C Interfase Estándar describe la interfase entre un terminal (DTE) y un modem (DCE) específicamente para la transferencia de dígitos seriales binarios. Su salida les deja mucha flexibilidad a los diseñadores de protocolos de hardware y software.

RS-232

DTE DCE

Terminal Modem

Con el paso del tiempo, esta interfase ha sido adaptada para usar con numerosos tipos de equipos como computadoras personales (PCs), impresoras, controladores programables, Controladores Lógicos Programables (PLCs), instrumentos y así sucesivamente.

Para reconocer estas aplicaciones adicionales, la ultima versión de los estándares, EIA-232C ha expandido el significado de la sigla DCE "Data Communication Equipment" a algo más general "Data Circuit-terminating Equipment" (Equipo de Circuitos-terminal de Datos).

EIA-232 tiene un número de inherentes debilidades que han hecho inadecuado para comunicación de datos para instrumentación y control en un ambiente industrial.

Consecuentemente, otras interfases EIA han sido desarrolladas para superar algunas de estas limitaciones. El más comúnmente usado entre estos para instrumentación y sistemas de control son EIA-423, EIA-422 y EIA-485.

2.7 HERRAMIENTAS DE SIMULACION

2.7.1 MatLab (MATrix LABoratory)

MATLAB es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Como caso particular puede también trabajar con números escalares (tanto reales como complejos), con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas.

Una de las capacidades más atractivas es la de realizar una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones. MATLAB tiene también un lenguaje de programación propio.

MATLAB® es, básicamente, un lenguaje de altas prestaciones para la computación en todas aquellas áreas basadas en procesamiento de datos, sean de la índole que sean. Además del lenguaje, MATLAB integra en un entorno de uso bastante sencillo y amigable, una gran cantidad de capacidades de cómputo, visualización y programación.

Los usos más típicos de MATLAB son:

- Análisis Matemático y Simulaciones Numéricas.
- Cálculo Simbólico.
- Desarrollo y Test de Algoritmos.
- Modelado de Sistemas.
- Análisis Estadísticos y Modelos Predictivos.
- Gráficos Científicos e Ingenieriles.
- Desarrollo de Aplicaciones y Productos Finales incluyendo GUI −Graphical User Interfaces−
- etc.

MATLAB es en última instancia un entorno de desarrollo interactivo cuyo elemento básico es un array. Esto es, MATLAB entiende los vectores y las matrices de la misma forma que C o Fortran entienden las variables. Sin la necesidad de desarrollar programación basada en bucles anidados para realizar operaciones entre arrays.

El nombre MATLAB hace referencia a matrix laboratory, y su código fue escrito, en principio, para proporcionar un acceso fácil al software de matrices desarrollado dentro de los proyectos LINPACK y EISPACK. Hoy en día, MATLAB emplea el software desarrollado por los proyectos LAPACK y ARPACK, que representan el estado−del−arte en cómputo matricial.

Desde su aparición, MATLAB ha ido renovándose y creciendo gracias a las contribuciones de sus usuarios. Producto del interés que distintas áreas científico−técnicas en MATLAB han surgido gran cantidad de funciones específicas para cada área que vienen agrupadas en un paquete denominado toolbox. Estas toolboxes consisten en colecciones de funciones para MATLAB m−functions desarrolladas para resolver problemas de un tipo particular. De entre esas áreas podemos citar

- Procesamiento de Señal.
- Sistemas de Control.
- Redes Neuronales.
- Procesamiento de Imágenes.
- Lógica Difusa.
- Caracterización y Modelado de Sistemas.
- Economía.
- Ecuaciones Diferenciales Multidimensionales.

El sistema completo MATLAB consiste de 5 bloques diferenciados y que pueden funcionar independientemente.

- *Entorno de Desarrollo:* Es el conjunto de herramientas que le permite usar los archivos y funciones de MATLAB. La mayoría de estas herramientas son interfaces gráficas para el usuario. En concreto la de más alto nivel es el denominado MATLAB desktop, que incluye al Command Window, al Command History, al Workspace viewer y al Path Browser.
- *Librería de Funciones:* Esta librería es una amplísima colección de algoritmos de cómputo de muy diversa complejidad, desde sumas, restas y funciones trigonométricas hasta obtención de FFTs, etc.

- *Lenguaje de MATLAB:* Es un lenguaje de programación de alto nivel cuyo elemento básico es un array. Como buen lenguaje de programación incluye sentencias de control de flujo, estructuras, y objetos.

- *Sistema de Gráficos:* Que le permite visualizar sus datos en una gran cantidad de representaciones distintas. Gracias a comandos de alto nivel Ud. podrá visualizar gráficos bidimensionales y tridimensionales, imágenes, animaciones, etc. Además incluye comandos de bajo nivel que le permitirán personalizar sus representaciones gráficas y construir interfaces gráficas para usuarios.
- *API −Application Program Interface−:* Esta es una librería que le permitirá escribir o re-usar sus funciones en C o Fortran y hacerlas interactuar con códigos escritos en el lenguaje nativo de MATLAB.

En la versión 6.5 MATLAB ha incorporado un acelerador JIT (Just in Time), que mejora significativamente la velocidad de ejecución de los ficheros *.m en ciertas circunstancias, por ejemplo cuando no se hacen llamadas a otros ficheros *.m, no se utilizan estructuras y clases, etc. En cualquier caso, el lenguaje de programación de MATLAB siempre es una magnífica herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas, fácil de utilizar y que, como ya se ha dicho, aumenta significativamente la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo.

2.7.2 Simulink

Simulink es una herramienta para el modelaje, análisis y simulación de una amplia variedad de sistemas físicos y matemáticos, inclusive aquellos con elementos no lineales y aquellos que hacen uso de tiempos continuos y discretos. Como una extensión de Matlab, Simulink adiciona muchas características específicas a los sistemas dinámicos, mientras conserva toda la funcionalidad de propósito general de MatLab. Así Simulink no es completamente un programa separado de MatLab, sino un anexo a él. El ambiente de MatLab está siempre disponible mientras se ejecuta una simulación en Simulink.

Simulink tiene dos fases de uso: la definición del modelo y el análisis del modelo. La definición del modelo significa construir el modelo a partir de elementos básicos construidos previamente, tal como, integradores, bloques de ganancia o servomotores. El análisis del modelo significa realizar la simulación, linealización y determinar el punto de equilibrio de un modelo previamente definido.

Para simplificar la definición del modelo Simulink usa diferentes clases de ventanas llamadas ventanas de diagramas de bloques. En estas ventanas se puede crear y editar un modelo gráficamente usando el ratón. Simulink usa un ambiente gráfico lo que hace sencillo la creación de los modelos de sistemas.

Después de definir un modelo este puede ser analizado seleccionando una opción desde los menús de Simulink o entrando comandos desde la línea de comandos de MatLab.

Simulink puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y ecuaciones diferenciales discretas. Esto significa que se puede modelar sistemas continuos en el tiempo, discretos en el tiempo o sistemas híbridos.

Simulink usa diagramas de bloques para representar sistemas dinámicos. Mediante una interfase gráfica con el usuario se pueden arrastrar los componentes desde una librería de bloques existentes y luego interconectarlos mediante conectores y

alambre. La ventana principal de Simulink se activa escribiendo simulink en la línea de comandos de MatLab, y se muestra a continuación:

Haciendo doble click en cualquiera de las librerías presentes en esta ventana se abrirá otra ventana conteniendo una cantidad de bloques relativos a dicha librería.

Para realizar un sistema debe abrirse una nueva ventana de diagrama de bloques seleccionando la opción file del menú principal del Simulink y allí la opción new.

En esta nueva ventana se colocarán todos los bloques interconectados que formarán el sistema deseado.

Como ejemplo se ha tomado un generador de ondas seno de la librería de fuentes "sources" y un osciloscopio de la librería "sinks", ambos se unieron mediante un conector usando el ratón. Este sistema se almacena como un archivo -m.

Haciendo doble click sobre cada elemento del sistema se pueden ver y modificar sus características.

Por ejemplo, al generador seno se le puede modificar su amplitud, frecuencia y fase. Al osciloscopio se le definen las escalas horizontal y vertical. Para ejecutar el programa se usa la opción simulation en el menú de la ventana del archivo -m creado.

En este submenú está la opción start que permite ejecutar el programa. También está la opción parameters que activa el panel de control de Simulink en donde se definen los métodos y parámetros usados para la simulación, tal como se muestra a continuación:

Existen numerosos bloques y funciones incorporados en las librerías de simulink que pueden ser empleados para simular cualquier sistema. Por ejemplo, para implementar un sistema que emplea un controlador PID tenemos:

En este diagrama se tiene al bloque llamado PID que fue definido previamente y agrupado como uno solo. El contenido de dicho bloque se obtiene haciendo doble click sobre él. A continuación se muestra el bloque PID:

Acelerador de Simulink

Para incrementar la velocidad de Simulink se debe instalar el acelerador "Accelerator". Este permite automáticamente generar una versión mejorada de los modelos los cuales correrán diez veces más rápido que el original. El acelerador puede ser usado sobre modelos continuos, discretos en el tiempo e híbridos.

El acelerador trabaja generando y compilando un código-C para un modelo dado. Una vez se completa la compilación, la simulación es ejecutada en la ventada de modelos de Simulink exactamente igual que antes sólo que más rápidamente. El propósito del acelerador es aumentar la velocidad de simulación.

Si el programa MatLab posee instalado el "Accelerator" podrá iniciarse la acción aceleradora seleccionando la opción simulation en el menú principal del Simulink y dentro de esta seleccionando la opción Accelerate. Esta acción es totalmente transparente en el sentido de que el incremento de la velocidad se presenta sin ningún otro requerimiento por parte del usuario.

Generador de código-C en Simulink

Una vez se ha creado un modelo dinámico en Simulink, se puede invocar el generador de código-C que permite convertir el diagrama de bloques implementado en un código C. Este puede ser útil para varios propósitos: puede ser usado para control en tiempo real, simulación en tiempo real o simulación acelerada en tiempo no real. Sus aplicaciones pueden ser control de movimiento, control de procesos, sistemas automotores, equipos médicos, robótica, etc.

El código-C es diseñado tal que puede ser ejecutado en tiempo real. No requiere ser escrito manualmente por un programador pues es creado a nivel de diagramas de bloques en Simulink. El código generado puede correr sobre un amplio rango de

hardware ubicado en estaciones de trabajo, PC o microprocesadores. Este código es la forma en la que puede usare el Simulink para adquisición de datos. Los sistemas dinámicos de simulación han sido proveídos para ser inmensamente útil cuando vienen para modelar sistemas y diseños de control. Esto porque salva el tiempo y dinero que de lo contrario se gastaría en un prototipo de sistemas físicos.

Simulink es un programa adicional a MATLAB® la cual es una herramienta de desarrollo para Mathworks, (http://www.mathworks.com) una compañía basada en Natick, MA. MATLAB es potente para la capacidad del análisis numérico amplio. Simulink® es una herramienta visual usada para programar un sistema dinámico (aquellos gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias) y mira estos resultados. Algunos circuitos lógicos, o un sistema de control para sistemas dinámicos pueden ser construidos para usar los Bloques de Construcción estándar disponibles en las librerías de Simulink.

Varios toolboxes para técnicas diferentes, como Lógica Difusa, Redes Neuronales, DSP, Estadística, etc. están disponibles con Simulink, las cuales realzan la potencia de procesamiento de la herramienta. La principal ventaja es la disponibilidad de plantillas / bloques de construcción, las cuales evitan el imprescindible escritura del código para varios procesos matemáticos. Conceptos de señal y flujo lógico en Simulink, datos/información de varios bloques son enviados a otro bloque por líneas conectando el bloque pertinente. Las señales pueden ser generadas y alimentadas entre bloques (dinámicos/estáticos).Los datos pueden ser alimentados entre funciones. Los datos pueden entonces ser dejados en lugares de almacenamiento como osciloscopios virtuales, displays o podrían ser guardados en archivos. Los datos pueden ser conectados de un bloque a otro, pueden ser ramificados, multiplexados, etc. En simulación, el dato es procesado y transferido solamente en tiempos discretos, ya que todas las computadoras son sistemas discretos. Así, un paso de tiempo de la simulación (de lo contarios llamaran un tiempo de Integración) es esencial, y la selección de esos pasos es determinado por la mas rápida dinámica en los sistemas simulados.

CAPITULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo permite conocer como se calcula el factor de potencia de desplazamiento (DPF), el factor de potencia por armónicos (g), el factor de potencia el cual es la multiplicación de los dos anteriores, cálculo del número mínimo de capacitores, el filtro adecuado para atenuar armónicos, además, se encuentran las formas de ondas de voltaje, corriente y la cantidad de armónicos.

MatLab permite realizar cálculos del factor de potencia y otros parámetros; Fuzzy Logic Toolbox realiza el control automático de la cantidad de capacitores que se conectan para que el factor de potencia sea el adecuado de acuerdo a los parámetros de las Empresas Eléctricas. Para encontrar el número de capacitores y filtro de armónicos se necesita datos de la red de lo por lo menos 15 días, en lo posible trabajando a plena carga la industria. Para la medición de datos de la red eléctrica (voltaje, corriente), se lo realizará por un conversor analógico digital.

3.2 CÁLCULO DEL FACTOR DE POTENCIA

Para calcular el factor de potencia, se obtiene a partir de los siguientes datos: voltaje y corriente, que deben ser tomados en tiempo real, la potencia activa que se ha consumido en todo el mes (planilla), el factor de potencia que la empresa distribuidora de energía eléctrica indique que es el apropiado. Para calcular el factor de potencia se usa las formulas de la potencia activa, reactiva y aparente, DPF, g, THD del Capítulo 2.

Se toma como base la figura 3.1, en la cual se tiene como dato el voltaje de entrada y la corriente producida por las cargas lineales y alinéales que se tiene en cualquier lugar, como son: industrias, residencias, etc. Con estos datos se calcula los parámetros necesarios para controlar el factor de potencia. Las formas de ondas producidas por el voltaje y la corriente se las tiene en la figura 3.2

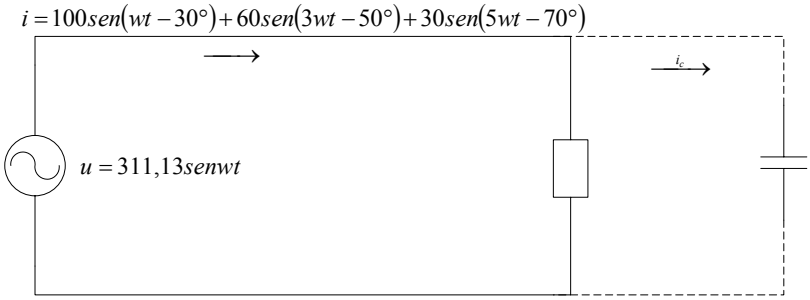

Fig. 3.1. Circuito equivalente de una carga

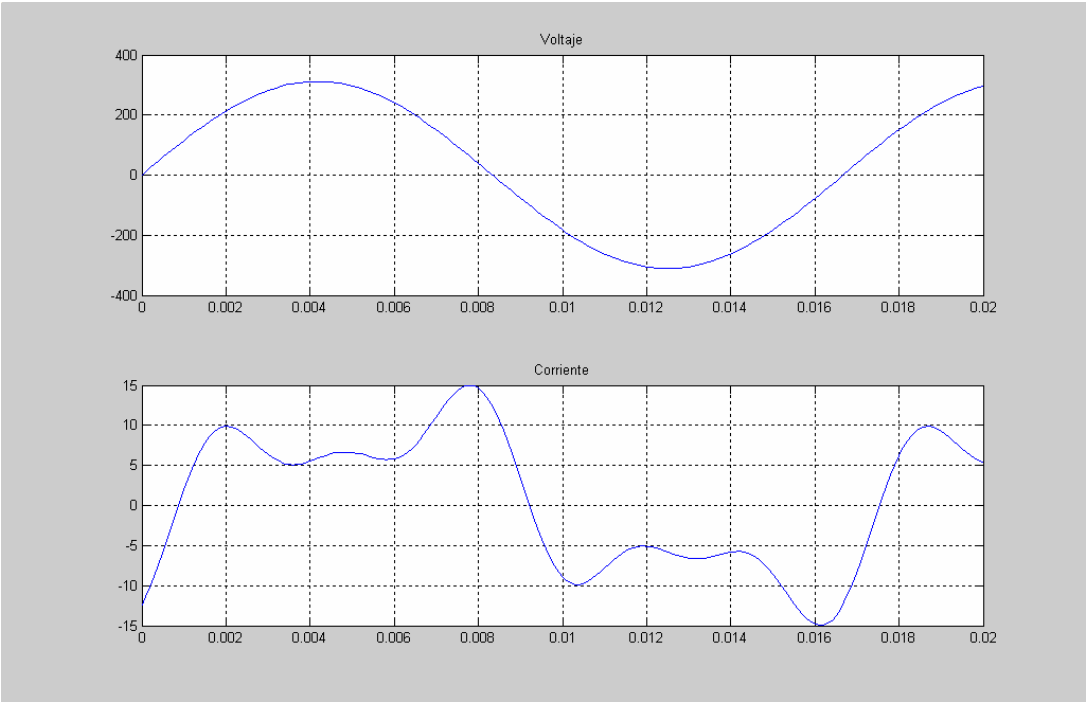

Fig. 3.2 Forma de onda de tensión y corriente para una carga residencial

El valor eficaz del voltaje se determina como la raíz cuadrada del voltaje pico:

$$U_{ef} = \frac{311.13}{\sqrt{2}} V = 220V$$

El valor eficaz de la corriente poliarmónica se determina como la raíz cuadrada de la suma de cada una de las armónicas:

$$I_{1ef} = \frac{60}{\sqrt{2}} A = 42.43A \qquad I_{3ef} = \frac{30}{\sqrt{2}} A = 21.21A \qquad I_{5ef} = \frac{10}{\sqrt{2}} A = 7.07A$$

$$I_{ef} = \sqrt{\left(\frac{60}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{30}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2} = 47.96\text{A}$$

La potencia aparente surgirá del producto de los valores eficaces de la corriente y la tensión

$$S = U_{ef} * I_{ef} = 220V * 47.96\text{A} = 10550.83\text{VA}$$

Para obtener los valores de potencia activa (P) y reactiva (Q) corresponderán sólo a aquellos que se derivan de la onda fundamental (primer armónico) de corriente y voltaje (la onda fundamental para este caso es la correspondiente a la frecuencia de la red que es 60 Hz), obteniéndose así:

$$P = \sum_{i=1}^{n} U_i I_i \cos\varphi_i = U_1 I_1 \cos\varphi_1 = 220 * \frac{60}{\sqrt{2}} * \cos 30° = 8083.32\text{W}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n} U_i I_i sen\varphi_i = U_1 I_1 sen\varphi_1 = 220 * \frac{60}{\sqrt{2}} * sen30° = 4666.9\text{VAr}$$

Los valores obtenidos permiten determinar el factor de potencia de la carga:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{8083.32}{10550.83} = 0{,}766$$

El valor 0.766, que se encuentra dentro del límite penalizable (<0.92), corresponde al "verdadero factor de potencia" y es aquél que registran los instrumentos electrónicos de verdadero valor.

Para ondas poliarmónicas este difiere del que se obtendría en comportamiento senoidal y que resulta del siguiente cálculo:

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{8083.32}{\sqrt{8083.32^2 + 4666.9^2}} = 0{,}866$$

Para corregir el factor de potencia de desplazamiento colocamos uno o varios capacitores en paralelo, este factor de potencia DPF se encuentra entre el valor de la fundamental de voltaje y la de corriente.

Para poder visualizar mejor estos conceptos se puede ver en la fig. 3.3 donde se muestran los distintos fasores correspondientes a las primeras armónicas de voltaje y corrientes presentes en el circuito.

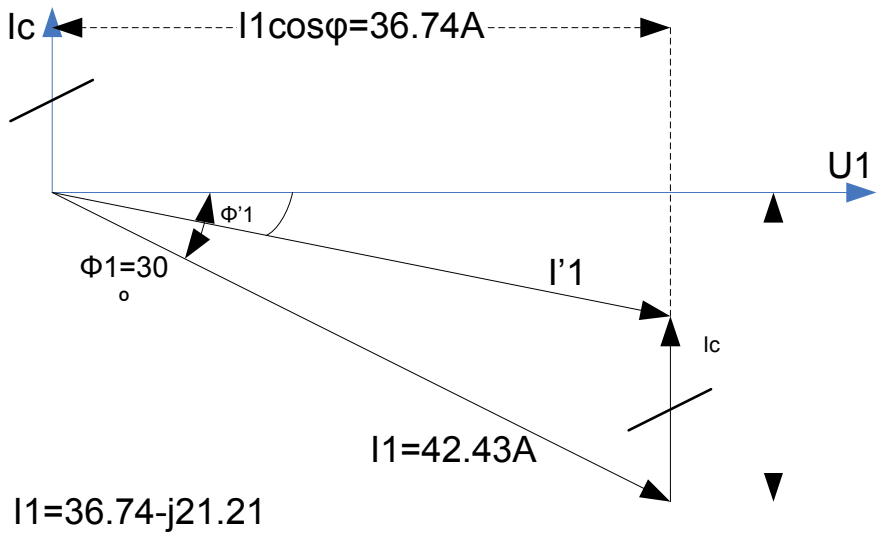

Fig. 3.3 Fasores de corriente inductiva y capacitiva, y voltaje

De acuerdo con lo que se observa en el fasorial el mínimo valor de la fundamental que es posible lograr con la adición de capacitores (se denomina genéricamente I'_1) será de 36.74A correspondiente a un ángulo ideal $\varphi'_1=0$ y a una corriente Ic = 21.21A. Como el resto de los componentes de la corriente no han sufrido modificación alguna, el nuevo valor eficaz de la corriente total será:

$$I'_{ef} = \sqrt{36.74^2 + 21.21^2 + 7.07^2} = 43A$$

Con este nuevo dato se calcula de nuevo los valores de potencia aparente y potencia activa, obteniendo así:

$$S = 220 * 43 = 9462.12VA$$
$$P = 8083.32W$$

El nuevo factor de potencia será entonces:

$$FP = \frac{8083.32}{9462.12} = 0.85$$

Al comparar con el factor de potencia anterior, este es el valor más próximo al ideal, al que se puede aspirar con la adición de capacitores. Si por alguna razón la corriente producida por los capacitores supera al producido por la carga, el factor de potencia tiende a desmejorar.

Para mejorar el factor de potencia se necesita calcular: el factor de potencia de desplazamiento (DPF), el factor de potencia por los armónicos (g) y el THD. Por tanto, el mismo ejercicio se calcula por otro método, como se indica a continuación.

$$U_{ef} = \frac{311.13}{\sqrt{2}}V = 220V$$

$$P = \sum_{i=1}^{n} U_i I_i \cos\varphi_i = U_1 I_1 \cos\varphi_1 = 220 * \frac{60}{\sqrt{2}} * \cos 30° = 8083.32\text{W}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n} U_i I_i sen\varphi_i = U_1 I_1 sen\varphi_1 = 220 * \frac{60}{\sqrt{2}} * sen30° = 4666.9\text{VAr}$$

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\varphi = \frac{8083.32}{\sqrt{8083.32^2 + 4666.9^2}} = 0.866$$

$$g = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}} = \frac{I_{1ef}}{\sqrt{{I_{1ef}}^2 + {I_{2ef}}^2 + {I_{3ef}}^2 + ... + {I_{nef}}^2}}$$

$$I_{ef} = \sqrt{\left(\frac{60}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{30}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2} = 47.96\text{A}$$

$$I_{1ef} = \frac{60}{\sqrt{2}} A = 42.43A$$

$$g = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}} = \frac{\frac{60}{\sqrt{2}}}{\sqrt{\left(\frac{60}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{30}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2}} = 0{,}884$$

$$D = V_{ef}\sqrt{{I_{2ef}}^2 + {I_{3ef}}^2 + ... + {I_{nef}}^2}$$

$$D = (220V)\sqrt{\left(\frac{30}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2} = 4919.35$$

$$Q = \sqrt{{Q_1}^2 + D^2} = \sqrt{4666.9^2 + 4919.35^2} = 6780.85$$

$$S = \sqrt{P^2 + {Q_1}^2 + D^2} = \sqrt{8083.32^2 + 4666.9^2 + 4919.35^2} = 10550.83$$

$$FP_{real} = \frac{P}{S} = \frac{8083.32}{10550.83} = 0{,}766$$

$$\text{FP}_{\text{real}} = \text{g} * \cos\varphi = 0.884 * 0.866 = 0.766$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n\to\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{{I_3}^2 + {I_5}^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{21.21^2 + 7.07^2}}{42.42} = 0{,}527$$

3.3 CÁLCULO DEL NÚMERO MÍNIMO DE CAPACITORES PARA EL BANCO DE CAPACITORES.

Las empresas eléctricas requieren que el factor de potencia existente FP_1=0.866 se corrija hasta que alcance un valor de FP_2= 0.92. Para lo cual se necesita el valor del voltaje, la corriente fundamental y la corriente total, al realizar el cálculo encontramos la potencia activa, reactiva y aparente con respecto a la fundamental, se tiene que:

Potencia activa: $P = \sum_{i=1}^{n} U_i I_i \cos\varphi_i = U_1 I_1 \cos\varphi_1 = 220 * \frac{60}{\sqrt{2}} * \cos 30° = 8083.32\text{W}$

Potencia reactiva: $Q = \sum_{i=1}^{n} U_i I_i sen\varphi_i = U_1 I_1 sen\varphi_1 = 220 * \frac{60}{\sqrt{2}} * sen30° = 4666.9\text{VAr}$

Potencia aparente: $S = \sqrt{8083.32^2 + 4666.9^2} = 9333.81\text{VA}$

Factor de potencia existente: $\cos\varphi_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{8083.32W}{9333.81VA} = 0.866$

Ya que cosφ= P/S y tanφ= Q/P; y a cada ángulo φ corresponde un valor determinado de la tangente y del coseno, se obtiene la potencia reactiva:

antes de la compensación Q1= P.tanφ_1 y después de la compensación Q2= P.tanφ_2;

resultando, según las funciones trigonométricas:

DPF1=cosφ_1= 0,86 se deduce tanφ_1= 0,58
DPF2=cosφ_2= 0,92 se deduce tanφ_2= 0,43

Por consiguiente, se precisa una potencia del capacitor de:

$$Q_C = P * (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = 8083.32W(0.58 - 0.43) = 1212.5VAr$$

Mediante la tabla 2.7 del Capítulo 2, se puede calcular la potencia reactiva dada por los capacitores, la cual indica los valores de tanφ_1 – tanφ_2. En el presente ejemplo resulta, para un valor de cosφ_1= 0,86 y uno deseado de cosφ_2= 0,92; un factor de F= 0.167 kVar/kW.

En tal caso, la potencia del capacitor necesaria es:

$$Q_C = P * F = 8083.32W * 0.167\frac{VAr}{W} = 1349.91VAr$$

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} = \frac{V^2}{\frac{1}{\omega C}} = V^2 \omega C$$

$$C = \frac{Q_C}{V^2 \omega} = \frac{Q_C}{2\pi f V^2} = \frac{1212.5}{2\pi(60)(220)^2} = 66.45\mu\text{F}$$

Se usa la tabla 2.8 del Capítulo 2 para encontrar el número exacto de capacitores que se necesita para corregir el factor de potencia con los cálculos anteriormente realizados. Por lo tanto se necesita 3 capacitores de 50μF para obtener la capacitancia total.

Para tener un amplio rango del control del factor de potencia, se tomó la decisión de realizar el cálculo con el peor factor de potencia (según mi criterio personal) de 0.7, por lo tanto tenemos:

DPF1 = 0.7
DPF2 = 0.92

Potencia activa: $P = \sum_{i=1}^{n} U_i I_i \cos\varphi_i = U_1 I_1 \cos\varphi_1 = 6533.67\text{W}$

Potencia reactiva: $Q = \sum_{i=1}^{n} U_i I_i sen\varphi_i = U_1 I_1 sen\varphi_1 = 6665.67\text{VAr}$

Potencia aparente: $S_1 = \sqrt{6533.67^2 + 6665.67^2} = 9333.81\text{VA}$

Factor de potencia existente: $\cos\varphi_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{6533.67W}{9333.81VA} = 0.7$

$P = 6533.67\text{W}$
$S = 9333.81\text{VA}$
$Q_L = \sqrt{S^2 - P^2}$

$$Q_L = 6665.67VAr$$

$$Q_C = Q_L - P_L\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta} - 1}$$

$$Q_C = 6665.67VAr - 6533.67W\sqrt{\frac{1}{(0.92)^2} - 1}\frac{VAr}{W} = 3882.34VAr$$

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} = \frac{V^2}{\frac{1}{\omega C}} = V^2\omega C$$

$$C = \frac{Q_C}{V^2\omega} = \frac{Q_C}{2\pi f V^2} = \frac{3882.34}{2\pi(60)(220)^2} = 212.77\mu\text{F}$$

Por tanto, se necesita 7 capacitores de 32μF a 250V.

3.4 CÁLCULO DEL FILTRO PARA ATENUAR LOS ARMÓNICOS.

Para calcular el filtro mas adecuado, se necesita que la relación *r* sea igual a uno por ciento (1%) y al usar las formulas del capítulo 2, se obtiene lo siguiente:

$$L_i C_i = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{(120\pi n)^2}\left(\frac{100+n}{100}\right) \qquad \text{(Filtro LC)}$$

$$f_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}$$

Se realiza los cálculos desde el segundo armónico hasta el cuarentavo armónico, luego con la ecuación anterior se obtiene todos los LiCi individuales, se suma estos valores individuales para encontrar la inductancia y la capacitancia adecuada que permita obtener un filtro que atenúe los armónicos, si se desea conocer cual es la frecuencia de corte se tiene que aplicar las ecuaciones anteriores.

La columna de **Armónicos n** se encuentra los valores del 2º hasta el 40º armónico.

La columna **LiCi** da los valores individuales de LiCi, se los calcula con la ecuación del Filtro LC anterior.

La columna **Suma de LiCi** se la obtiene de la siguiente forma:

- El segundo armónico es la base de cálculo para los demás, se obtiene el valor de LiCi. El LiCi del tercer armónico se suma con el segundo. El LiCi del cuarto se suma con el anterior, y así sucesivamente hasta encontrar los valores de LiCi del segundo hasta el cuarentavo armónico.

La columna **Frecuencia** se obtiene sacando el inverso la raíz de cada valor de LiCi.
La columna **LiCi total** es la sumatoria de todos los LiCi individuales.
La columna **Frecuencia de corte** es el inverso de la raíz de la columna LiCi total.

Armónico n	LiCi	Suma de LiCi	Frecuencia	LiCi total	Frecuencia corte
2	8,97115E-05	8,9711E-05	105,578631	0,00014632	82,669802
3	2,68418E-05	0,00011655	92,6270486		
4	1,14338E-05	0,00012799	88,3928181		
5	5,9104E-06	0,0001339	86,4199156		
6	3,45295E-06	0,00013735	85,3267162		
7	2,19496E-06	0,00013955	84,6529876		
8	1,4842E-06	0,00014103	84,2063648		
9	1,05205E-06	0,00014208	83,8940303		
10	7,73981E-07	0,00014286	83,6664557		
11	5,8679E-07	0,00014344	83,4951502		
12	4,5605E-07	0,0001439	83,3627369		
13	3,61898E-07	0,00014426	83,2581074		
14	2,9232E-07	0,00014455	83,173881		
15	2,39752E-07	0,00014479	83,1049915		
16	1,99267E-07	0,00014499	83,0478648		
17	1,67563E-07	0,00014516	82,9999184		
18	1,42365E-07	0,0001453	82,9592473		
19	1,22074E-07	0,00014542	82,9244204		
20	1,05543E-07	0,00014553	82,8943451		
21	9,19317E-08	0,00014562	82,868175		
22	8,06175E-08	0,0001457	82,8452462		

23	7,11311E-08	0,00014577	82,8250312
24	6,3114E-08	0,00014584	82,807107
25	5,62895E-08	0,00014589	82,7911307
26	5,04415E-08	0,00014594	82,7768221
27	4,53994E-08	0,00014599	82,7639502
28	4,10274E-08	0,00014603	82,752323
29	3,72163E-08	0,00014607	82,74178
30	3,3878E-08	0,0001461	82,7321863
31	3,09403E-08	0,00014613	82,7234274
32	2,8344E-08	0,00014616	82,715406
33	2,60404E-08	0,00014619	82,7080385
34	2,39887E-08	0,00014621	82,7012533
35	2,21548E-08	0,00014623	82,6949882
36	2,05102E-08	0,00014625	82,6891895
37	1,90306E-08	0,00014627	82,6838102
38	1,76956E-08	0,00014629	82,6788092
39	1,64876E-08	0,00014631	82,6741504
40	1,53917E-08	0,00014632	82,669802

Tabla 3.1 Cálculo de los LiCi y la frecuencia de corte

Se toma el dato de la sumatoria de todos los LiCi individuales. Por lo tanto con la Tabla 2.8 (Capacidad de los condensadores y sus dimensiones) de capacitores se toma el capacitor normalizado de Ci y se calcula el valor de la inductancia Li. Así, se obtiene lo siguiente:

$$L_i C_i = 0.00014632$$
$$C_i = 100\mu F$$
$$L_i = 1.4632H$$

Se obtiene así una frecuencia de corte de:

$$f_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} = 82{,}669802\ \text{Hz}$$

3.5 DISEÑO DEL CONTROLADOR CON LÓGICA DIFUSA.

El diseño del controlador con Lógica Difusa se lo ha realizado en el Fuzzy Logic Toolbox de MatLab. Ya que esta es una herramienta muy poderosa para el control automático, en este caso el control de capacitores para mejorar el Factor de Potencia de desplazamiento o el control del filtro para reducir los armónicos de la red.

Para encontrar la mejor función de pertenencia para el problema se debe analizar algunos parámetros dados en la tabla 3.2, los cuales ayudarán a elegir la mas adecuada.

Funciones de membresía	**Por Definición**		**Por Complejidad de cálculos**		**Velocidad de Control**		
	Teórico	**Práctico**	**Muchos**	**Pocos**	**Lento**	**Medio**	**Rápido**
Triangular		*		*			*
Trapezoidal		*		*			*
Gamma	*		*		*		
S	*		*		*		
Gaussiana		*	*			*	
Pseudo-Exponencial	*		*		*		

Tabla 3.2 Análisis de Función de Membresía

Para este tipo de problema exclusivamente se puede escoger las Funciones de pertenencia tipo Gausiana, Triangular y Trapezoidal (las cuales se encuentran en MatLab y permiten simular estos tipos de funciones), debido que permiten realizar cálculos en tiempo real.

Interfaz de Fusificación (Funciones de Membresía)

MUY BAJO va desde 0.6 a 0.77

MUY BAJO-BAJO va desde 0.77 a 0.8

BAJO va desde 0.8 a 0.85

BAJO-MEDIO va desde 0.85 a 0.87

MEDIO va desde 0.87 a 0.91

MEDIO-OPTIMO va desde 0.91 a 0.92

OPTIMO-ALTO va desde 0.92 a 0.93

ALTO 0.93 a 1

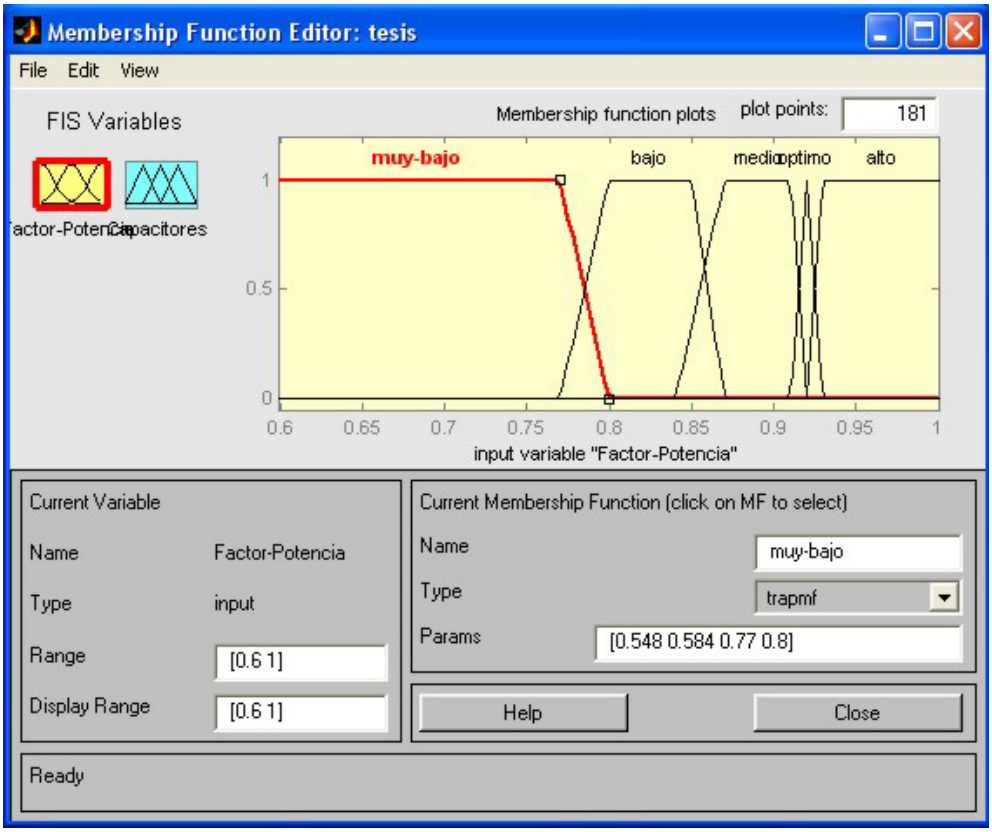

Fig. 3.4: Funciones de Membresía

Luego de encontrar las funciones de membresía con los valores adecuados y su respectivo modelo lingüístico, se realiza las condiciones que permitan actuar de la manera más rápida a los capacitores para que el factor de potencia llegue a su valor óptimo. Una de las posibles formas para controlar se basa en las reglas las cuales se enumeran a continuación:

Base de Conocimientos (Reglas)

Muchas veces según las reglas que se use, el control de las variables puede ser óptima, muy lentas o definitivamente no controle nada. Por eso, las reglas son parte primordial de un control basado en lógica difusa, la toma de decisión es depende totalmente de estas y puede ayudar o simplemente dañar lo que se necesite controlar. Por lo tanto, las reglas descritas a continuación son una de las posibilidades que existe para controlar los capacitores, siendo estas las siguientes:

1. *SI* Factor de Potencia es **MUY BAJO** *ENTONCES* (7) Capacitores ON (7).
2. *SI* Factor de Potencia es **BAJO** *ENTONCES* (5) Capacitores ON, (2) OFF.
3. *SI* Factor de Potencia es **MEDIO** *ENTONCES* (3) Capacitores ON y (4) OFF.
4. *SI* Factor de Potencia es **ÓPTIMO** *ENTONCES* (1) Capacitor ON y (6) OFF.
5. *SI* Factor de Potencia es **ALTO** *ENTONCES* todos los capacitores apagados.

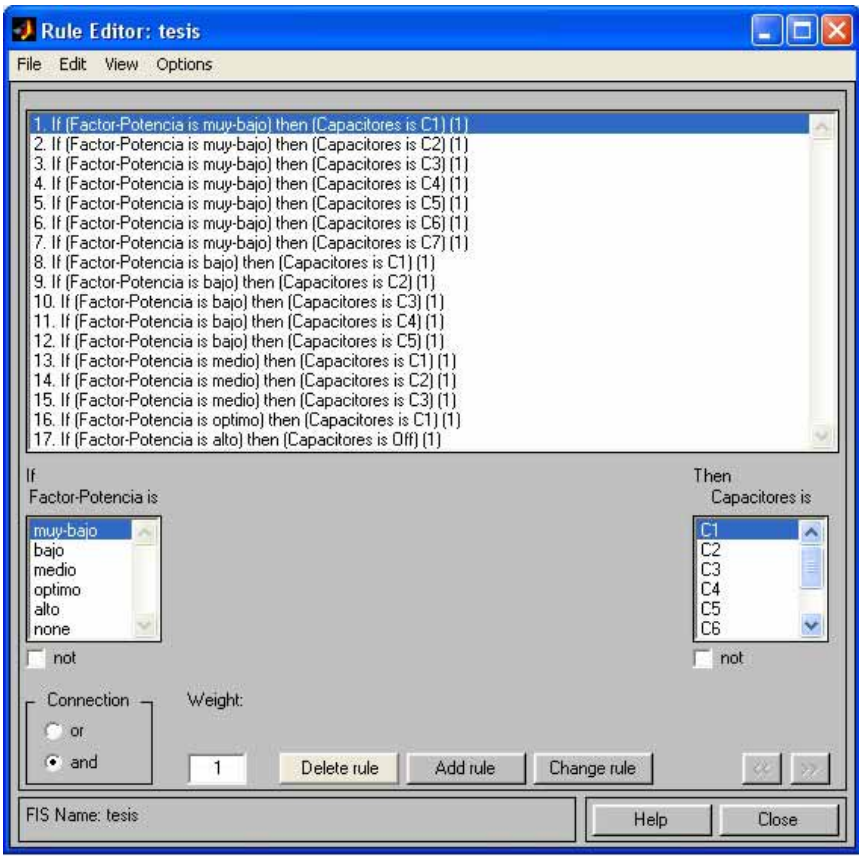

Fig. 3.5: Reglas Difusas

Para el control de la salida se ha utilizado un control discreto el cual enciende o apaga los capacitores como se indica en el interfaz de defusificación:

Interfaz de Defusificación.

Cuando se ha encontrado las reglas óptimas, se debe encontrar un interfaz que satisfaga la condición de salida, el interfaz que se pone a consideración es una salida discreta, que enciende y apague los capacitores, existen otros métodos que se describió en el capitulo anterior, pero este exclusivamente es el más adecuado para controlar la salida.

Se enciende siete capacitores cuando el Factor de Potencia esta en MUY BAJO
Se enciende cinco capacitores cuando el Factor de Potencia esta en BAJO.
Se encienden tres capacitores cuando el Factor de Potencia esta en MEDIO.
Se enciende un capacitores cuando el Factor de Potencia esta en OPTIMO.
Se apagan todos cuando el Factor de Potencia esta en ALTO.

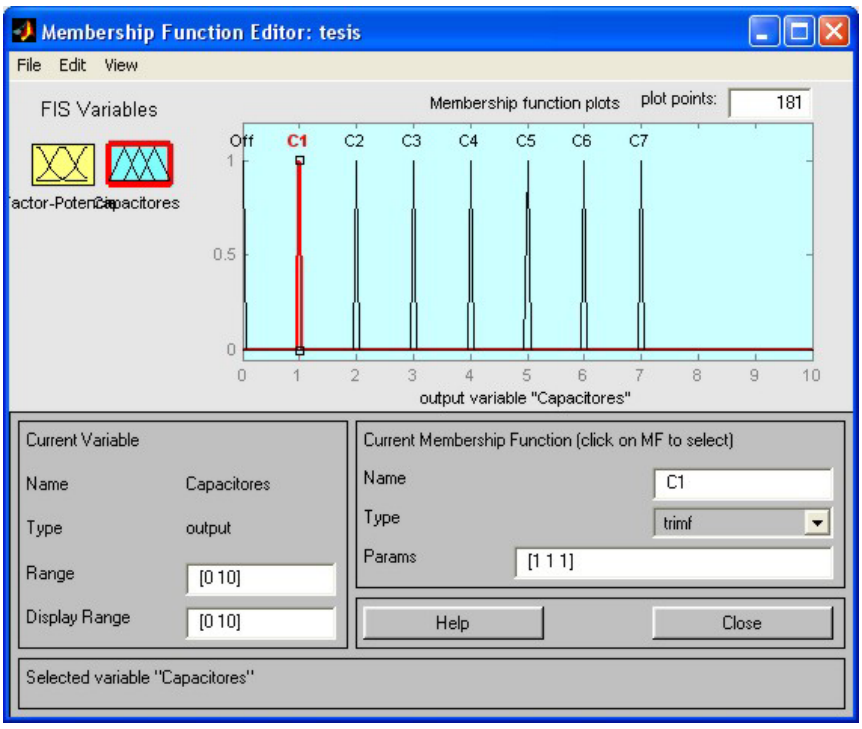

Fig. 3.6: Interfaz de defusificasión

En el Fuzzy Logic Toolbox existe la posibilidad de simular el funcionamiento de las funciones de membresía y las reglas difusas, las cuales se muestran en la fig. 3.7.

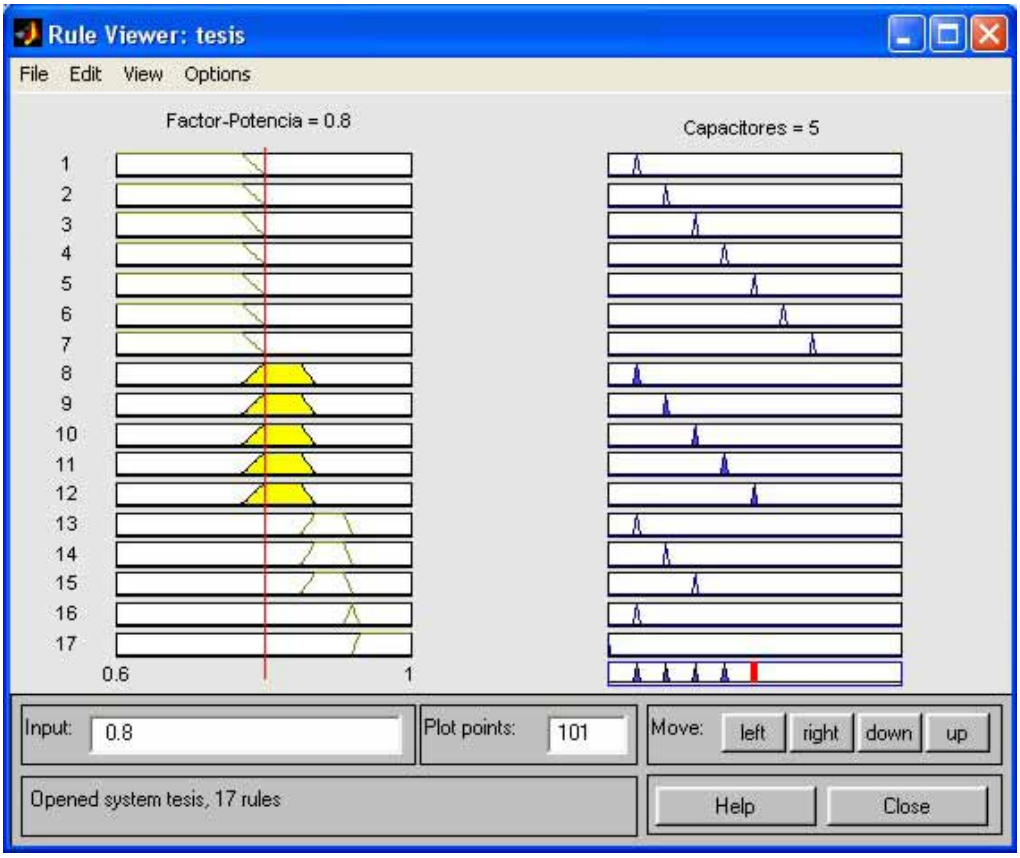

Fig. 3.7. Visor de Reglas

3.6 SIMULACIÓN DEL SISTEMA.

El sistema utiliza un banco de bobinas, con el fin de variar el factor de potencia, el cual esta formado por tres tipos de reactancia: 300, 150 y 100 Ω, para obtener estos valores de reactancia inductiva se coloca en paralelo las bobinas, generando así un factor de potencia que varia según los tipos de reactancia obtenidas. Por ejemplo: para el cálculo de la reactancia de 150 Ω se tiene:

$X_L = 300\Omega$;

$X_{LT} = (X_L * X_L)/(X_L + X_L)$

$X_{LT} = (300 * 300)/(300 + 300) = 150\Omega$.

donde:

X_L → es la reactancia estándar que maneja el banco de bobinas

X_{LT} → es la reactancia en paralelo.

En cualquier industria que maneje cargas inductivas generan un bajo factor de potencia, por la fluctuación de reactancias inductivas, debido al trabajo de los motores. Para la simulación del sistema se utiliza también: una fuente de voltaje en serie con una resistencia y una bobina, la onda de corriente producida por la resistencia y bobina generan un retraso con respecto a la onda de voltaje, la diferencia del desfase del voltaje con respecto a la corriente se la conoce como **factor de potencia**, además permite indicar la cantidad de capacitores que tienen que conectarse para que el factor de potencia pueda mejorar. Para comprender mejor como funciona el circuito se ha realizado varios casos de simulación entre los que se encuentra:

3.6.1 CASO A: Resistencia de 300 Ohmios y Reactancia Inductiva de 300 Ohmios

Simulación del sistema sin la conexión de capacitores

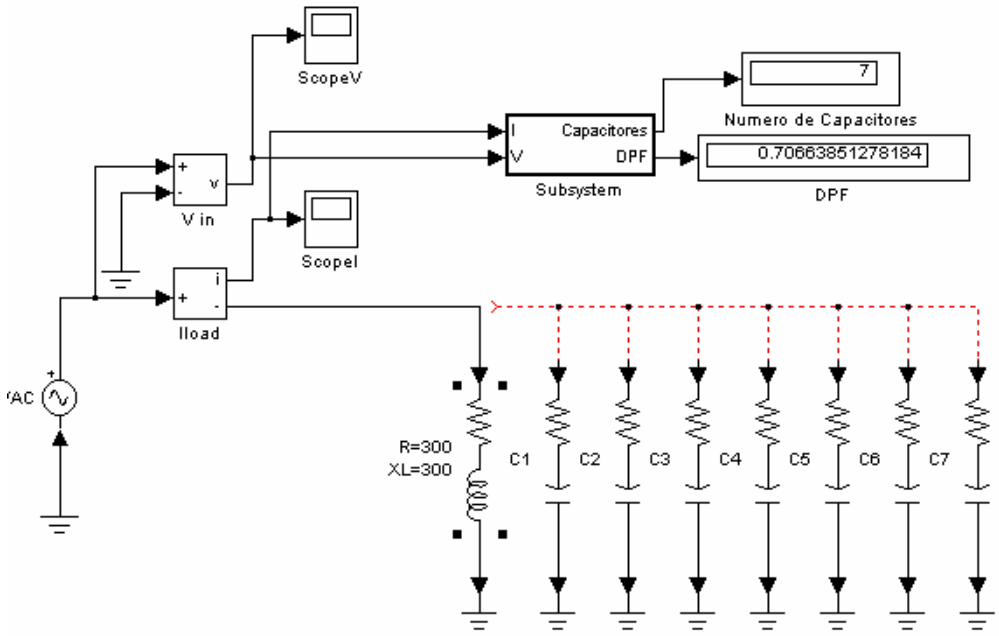

Fig. 3.8 Simulación del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse.

Al observar la simulación se encuentra que el factor de potencia producida por la bobina es de aproximadamente 0.707, el sistema difuso indica que deben encenderse siete capacitores. (Fig. 3.8).

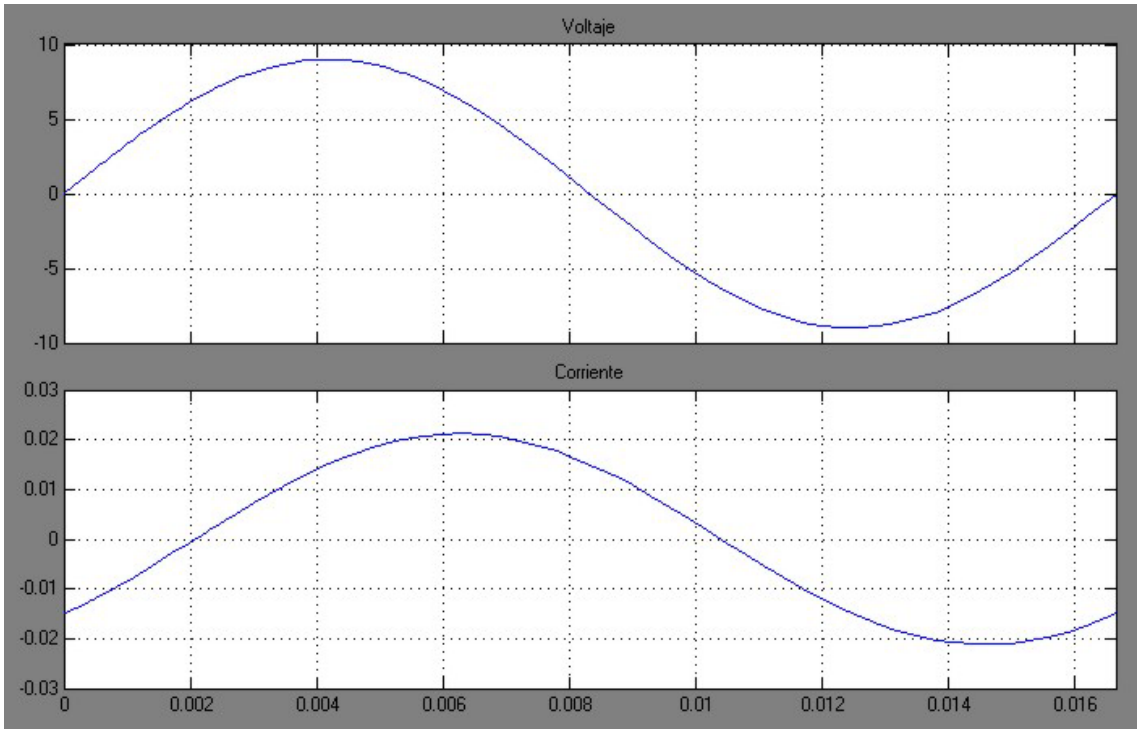

Fig. 3.9 Simulación de las ondas de Voltaje y Corriente sin corregir el factor de potencia.

En la Figura 3.9 se observa las ondas de voltaje y corriente, entre las cuales existe un desplazamiento ***(Factor de Potencia).***

Simulación del sistema con la conexión de capacitores

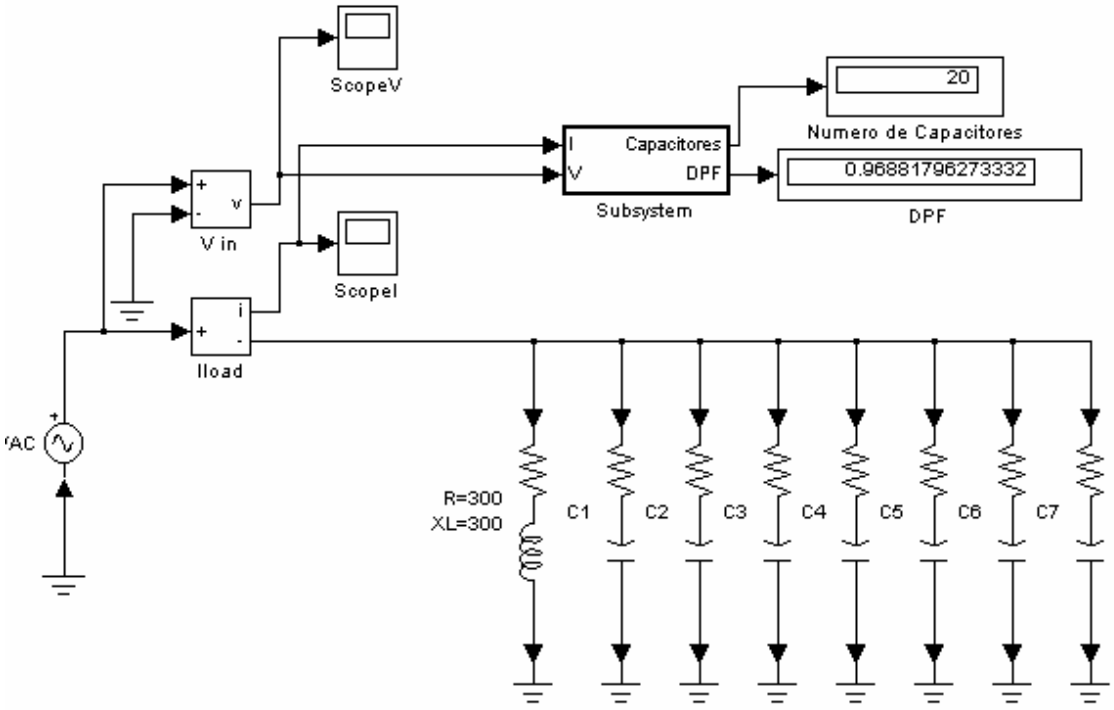

Fig. 3.10 Conexión de capacitores necesarios para mejorar el factor de potencia y el nuevo valor factor de potencia.

El sistema difuso para este caso realiza la conexión de siete capacitores, para mejora el factor de potencia (FP = 0.969), es decir, ingresa carga capacitiva al circuito lo que permite disminuir la carga inductiva mejorando el factor de potencia. (Fig. 3.10).

En la Figura 3.11 se encuentra las ondas de voltaje y corriente simulada después de ser corregido por los capacitores, el desplazamiento de la onda de corriente con respecto a la onda de voltaje se reduce (Fig. 3.9)

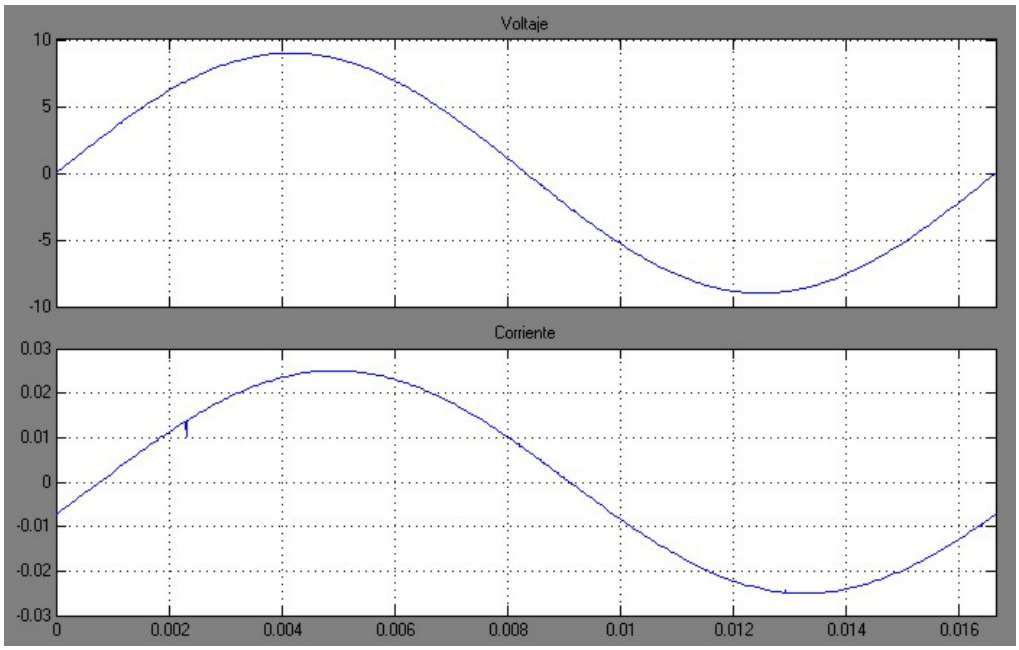

Fig. 3.11 Ondas de Voltaje y Corriente corregido el factor de potencia.

3.6.2 CASO B: Resistencia de 300 Ohmios y Reactancia Inductiva de 150 Ohmios

Simulación del sistema sin la conexión de capacitores

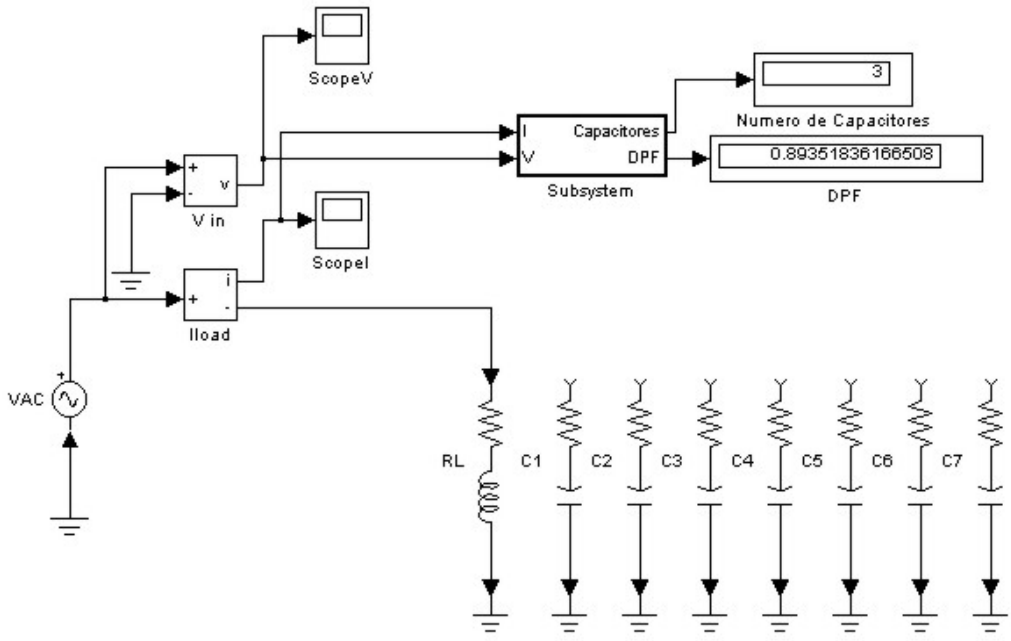

Fig. 3.12 Simulación del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse.

Al observar la simulación se encuentra que el factor de potencia producida por la bobina es de aproximadamente 0.894, el sistema difuso indica que deben encenderse tres capacitores. (Fig. 3.12).

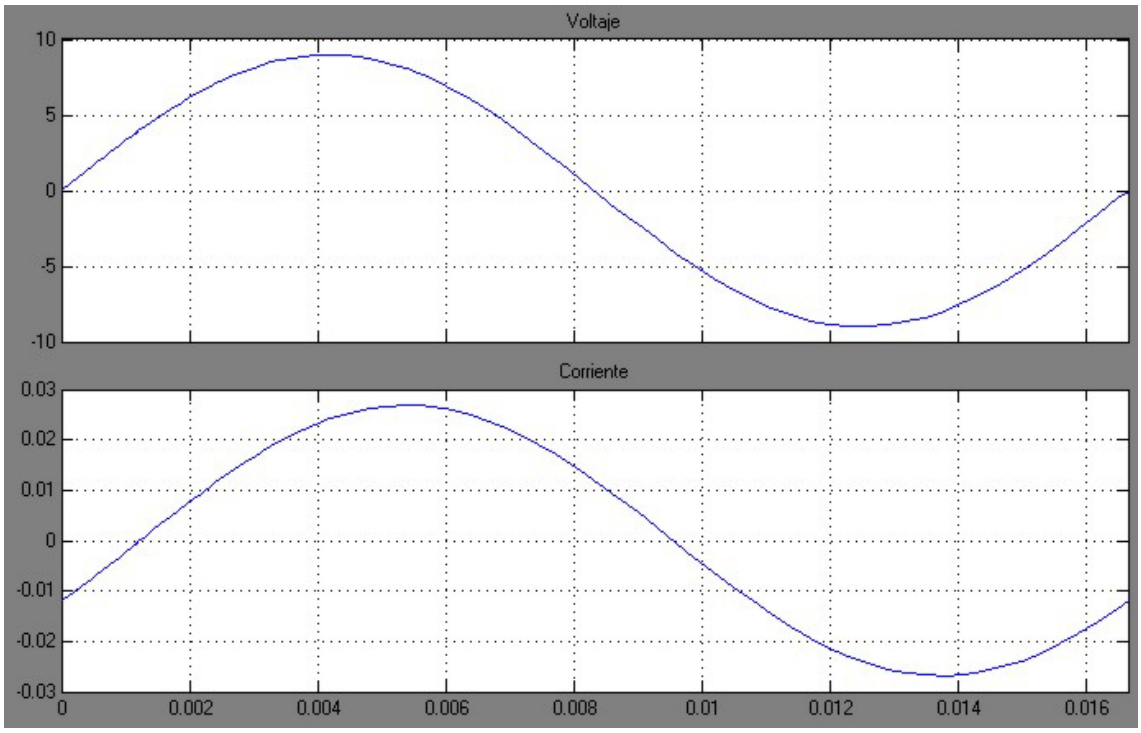

Fig. 3.13 Simulación de las ondas de Voltaje y Corriente sin corregir el factor de potencia.

En la Figura 3.13 se observa las ondas de voltaje y corriente, entre las cuales existe un desplazamiento ***(Factor de Potencia).***

Simulación del sistema con la conexión de capacitores

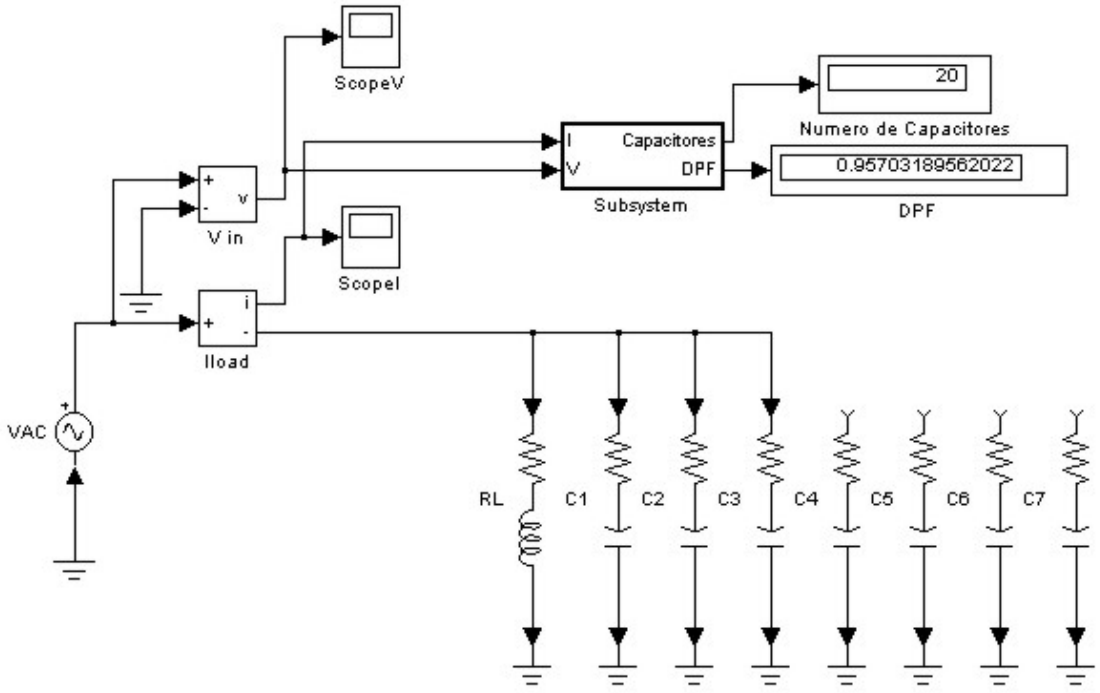

Fig. 3.14 Conexión de capacitores necesarios para mejorar el factor de potencia y el nuevo valor factor de potencia.

El sistema difuso para este caso realiza la conexión de siete capacitores, para mejora el factor de potencia (FP = 0.957), es decir, ingresa carga capacitiva al circuito lo que permite disminuir la carga inductiva mejorando el factor de potencia. (Fig. 3.14).

En la Figura 3.15 se encuentra las ondas de voltaje y corriente simulada después de ser corregido por los capacitores, el desplazamiento de la onda de corriente con respecto a la onda de voltaje se reduce Fig. 3.13

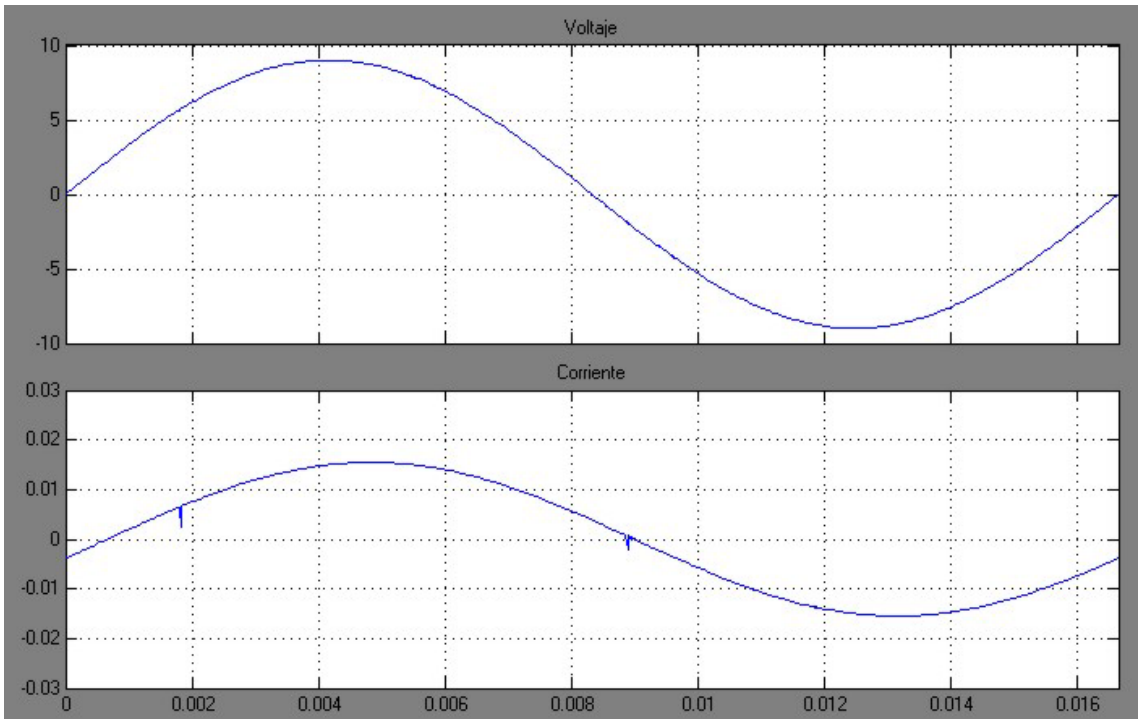

Fig. 3.15 Ondas de Voltaje y Corriente corregido el factor de potencia.

3.6.3 CASO C: Resistencia de 300 Ohmios y Reactancia Inductiva de 100 Ohmios

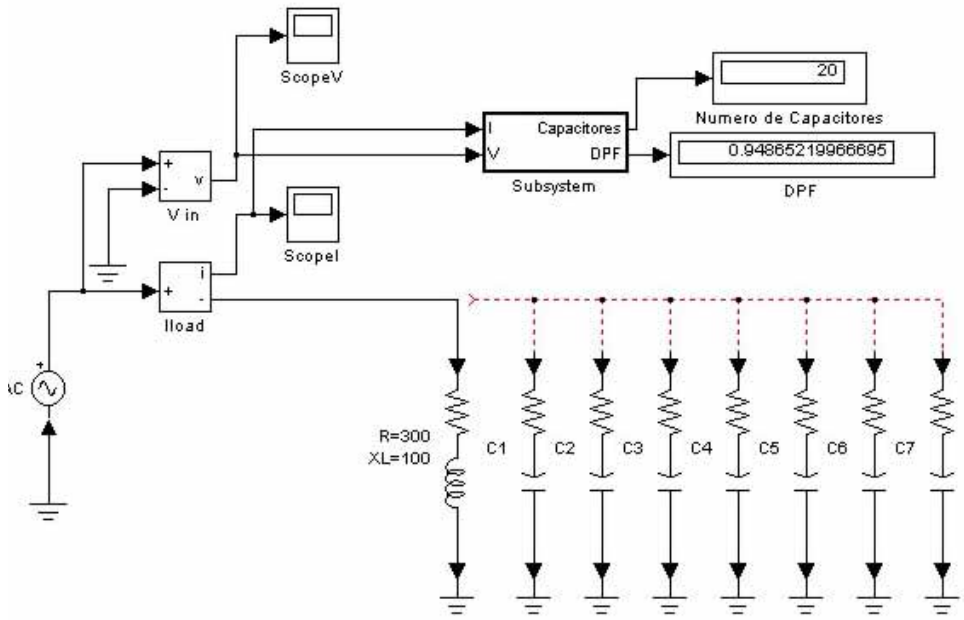

Fig. 3.16 Simulación del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse.

Al observar la simulación se encuentra que el factor de potencia producida por la bobina es de aproximadamente 0.949, el sistema difuso indica que todos deben estar apagados (Fig. 3.16).

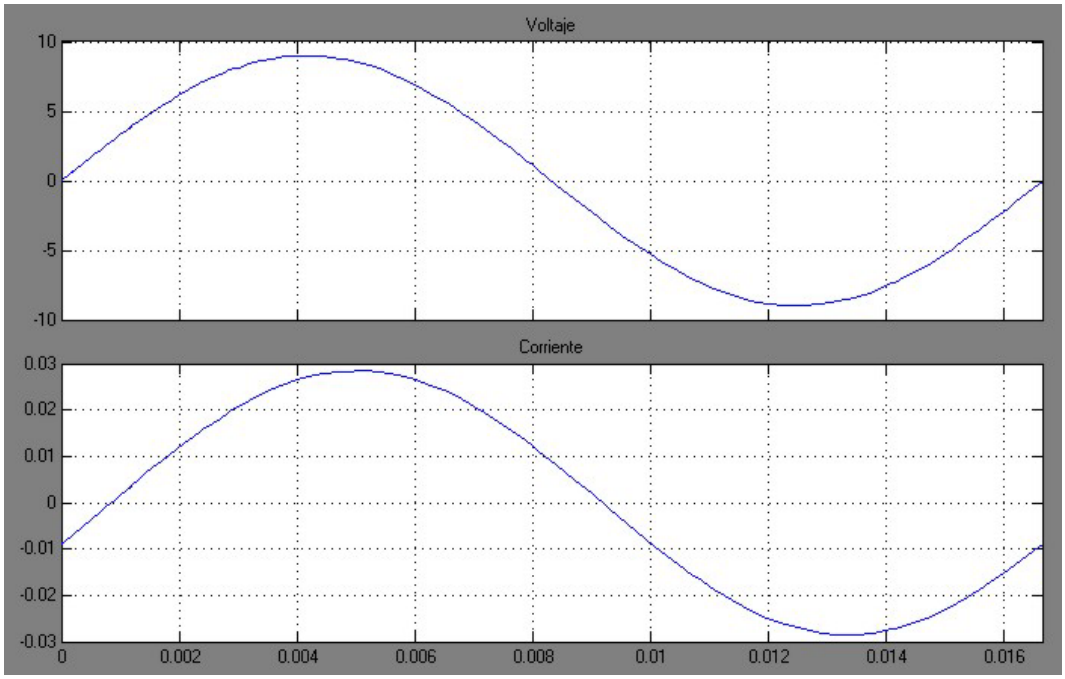

Fig. 3.17 Simulación de las ondas de Voltaje y Corriente sin corregir el factor de potencia.

En la Figura 3.17 se observa las ondas de voltaje y corriente, entre las cuales existe un desplazamiento mínimo ya que se acerca al valor de 1 ***(Factor de Potencia).***

Como se puede observar en las figuras anteriores, se deduce que mientras menor es el factor de potencia de desplazamiento, mayor es la cantidad de capacitores que se conectan para mejorar el factor de potencia de desplazamiento (tabla 3.3)

Carga		DPF simulado		Número
R(Ω)	XL(Ω)	sin correccion	con correccion	Capacitores
300	300	0,7065	0,969	7
300	150	0,8935	0,957	3
300	100	0,9485	0,9485	0

Tabla 3.3 Datos Simulados.

De esta tabla se puede concluir que el factor de potencia depende exclusivamente de la reactancia inductiva y mientras mayor sea el valor de la inductancia menor es el factor de potencia, para corregir este problema se conectan capacitores en paralelo a la carga.

3.7 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

La construcción del prototipo se lo realiza en varias partes, siendo estas las siguientes:

- Adquisición de datos
- Programación
- Salida

3.7.1 Adquisición de Datos.

Para sensar el voltaje y la corriente es necesario conocer las características de funcionamiento del elemento a utilizarse, estas características se existen en los DATA SHEET o tabla de datos que el fabricante indica para decidir por un elemento u otro, por ejemplo: los convesores analógicos digitales o tarjetas de adquisición de datos, ¿Qué voltaje soportan?, ¿Qué frecuencia usan?, ¿Cuántos canales tiene para ingresar señales?, etc. Al conocer todos estos parámetros, se decide cual de esos elementos nos interesa para incluirlo en el sistema que se vaya a realizar. Se convierte con este elemento, la señal continua de voltaje y corriente a una señal discreta. Luego de conocer cual es elemento adecuado, se sensa la señal de voltaje (por medio de un Transformador de potencial o voltaje TP), si la señal esta en el rango adecuado de las características del conversor, se conecta directamente; la señal de corriente se sensa (por medio de un Transformador de corriente TC), pero como la mayoría de conversores analógicos digitales solo aceptan valores de voltaje, esta corriente se la debe cambiar a voltaje por medio de una resistencia en paralelo con el TC, por lo general esta resistencia esta en un rango de 100 Ω a 500 Ω, dependiendo del valor de voltaje que se quiera tener a la salida.

3.7.2 Programación

Con los datos antes obtenidos por medio del conversor analógico digital e introducidos a la memoria del computador por un programa adecuado (Matlab), se procede a calcular el Factor de Potencia, Armónicos, etc. Matlab es una herramienta que permite realizar los cálculos matemáticos en forma sencilla, en especial los relacionados con la transformada discreta de fourier (DTF) para encontrar los armónicos de la red, otra ventaja del programa es que se puede usar varios de los Toolbox, en este caso el Fuzzy Logic Toolbox para realizar el control del automático del factor de potencia por medio de capacitores.

3.7.3 Salida

Para el control de la conexión y desconexión de los capacitores, se requiere tener salidas digitales en la misma cantidad del valor máximo de capacitores que se han calculado previamente, estas salidas digitales lo encontramos en el puerto paralelo o de algún circuito integrado que nos permita cambiar la información del programa en valores reales de salida.

CAPITULO IV

PRUEBAS

4.1 REALIZACIÓN DE TODAS LAS PRUEBAS NECESARIAS PARA DEMOSTRAR EL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.

Antes de empezar con la prueba se debe conocer los datos de voltaje y corriente con que trabaja la industria o la empresa de distribución. Por lo general se mide en el lado de baja tensión el cual se encuentra en 110V (monofásica) o 220V (bifásica o trifásica).

Estos voltajes se reducen por medio de transformadores de voltaje o TP al voltaje que el microcontrolador o la tarjeta de adquisición de datos soporte, estos datos se encuentra en el manual de usuario de la tarjeta o del microcontrolador.

Si es necesario se realiza un acondicionamiento de señal ya que muchas veces el voltaje que entregan estos transformadores no son los adecuados para digitalizarlos.

A continuación, se obtiene la señal de corriente por medio de un transformador de corriente (TC), o también, por medio de unas pinzas amperimétricas, cada uno de estos aparatos indican la relación de transformación (ej: en el caso de los TC puede ser de 100/5, etc. y en el caso de las pinzas amperimétricas por cada amperio se reduce a un miliamperio).

En paralelo a la salida del TC o de las pinzas ponemos una resistencia de un valor estándar sea esta, entre 100 y 500 Ω, por medio de la ley de ohm se encuentra el voltaje que es la multiplicación de corriente y resistencia, y al igual que en el caso anterior se podría realizar un acondicionamiento de señal si fuese necesario o en caso contrario ingresar directamente esta señal a la tarjeta de adquisición o al conversor.

El sistema utiliza un banco de tres bobinas independientes, cada bobina tiene una reactancia de 300 Ω con una tolerancia del 1%, existen en el banco de bobinas el valor de la inductancia en henrios igual a 0.8H, entonces se calcula el valor de la reactancia con la siguiente fórmula $X_L = 2 * \pi * f * L$

donde:

- X_L → Reactancia inductiva
- f → frecuencia de la energía eléctrica
- L → Valor constante de la inductancia en Henrios (H)

Por lo tanto, el banco de bobinas depende de la frecuencia de la red de distribución eléctrica y la tolerancia que el fabricante indica.

La frecuencia no es estable ya que varia en el transcurso del tiempo entre 59.8 y 60.2, el otro parámetro es la tolerancia que viene de fábrica, en este caso el valor nominal es de 300Ω ± 1%, para variar el factor de potencia se varía la reactancia inductiva colocando en paralelo las bobinas antes mencionadas.

A continuación se tiene las formas de ondas de voltaje y corriente de acuerdo al valor de resistencia y bobina(s) conectadas en serie con la fuente de voltaje, para cambiar el valor de la reactancia inductiva el banco de bobinas se ha conectado en paralelo para disminuir la reactancia.

El programa calcula el factor de potencia a partir de las ondas de voltaje y corriente, luego, toma el valor de factor de potencia de desplazamiento y el sistema difuso decide la cantidad de capacitores que deben conectarse para mejorarlo. Tenemos tres casos generales:

4.1.1 CASO A: Resistencia de 300Ω y Reactancia Inductiva de 300Ω

Adquisición de datos del sistema sin la conexión de capacitores

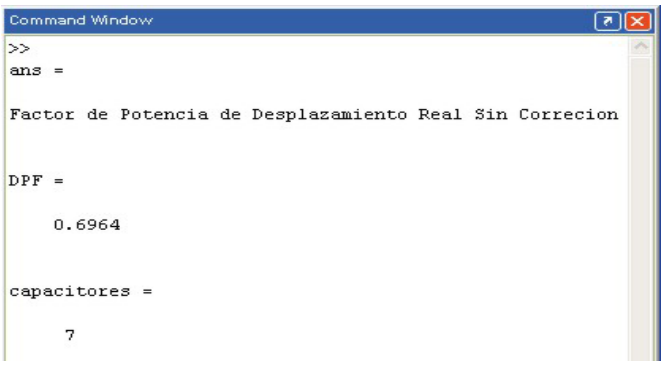

Fig. 4.1 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse.

El programa del sistema difuso con los datos adquiridos de voltaje y corriente, encuentra el valor del factor de potencia producida por la bobina de aproximadamente 0.696, el sistema difuso indica que deben encenderse siete capacitores. (Fig. 4.1).

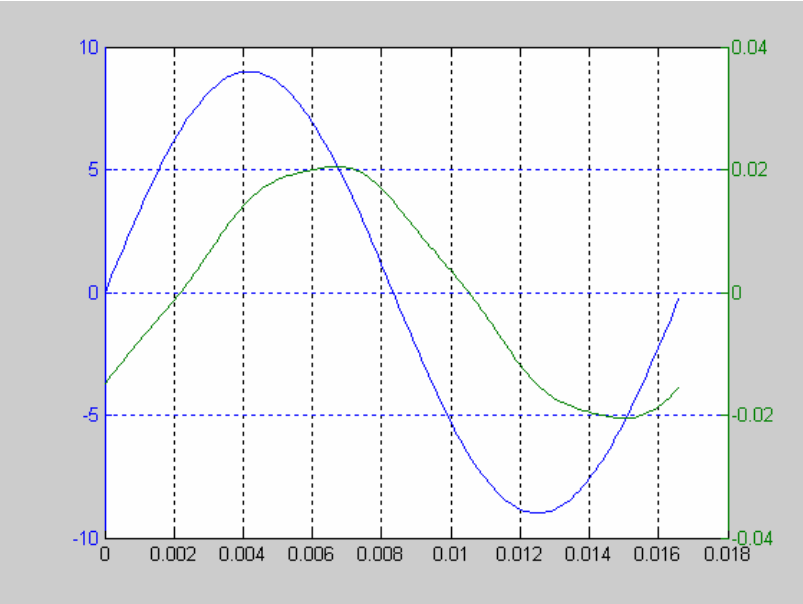

Fig. 4.2 Ondas de Voltaje (azul) y Corriente (verde) sin corregir el factor de potencia.

En la Figura 4.2 se observa las ondas de voltaje (azul) y corriente (verde), entre las cuales existe un desplazamiento ***(Factor de Potencia de desplazamiento).***

Adquisición de datos del sistema con la conexión de capacitores

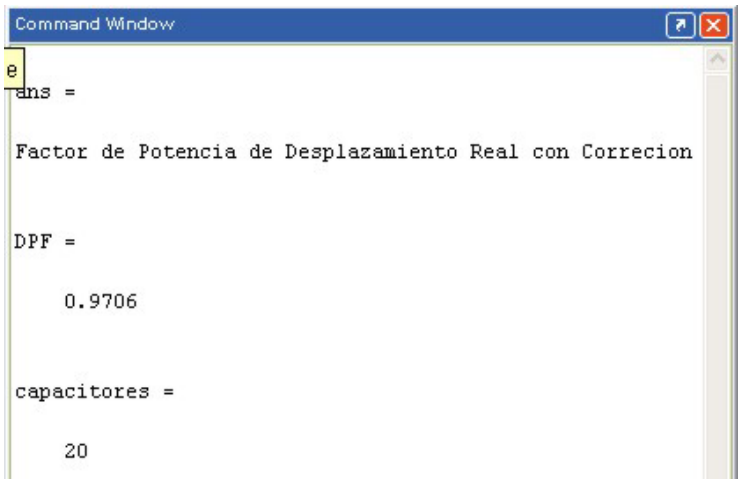

Fig. 4.3 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento conectado los capacitores.

El programa del sistema difuso con los datos adquiridos de voltaje y corriente, calcula el nuevo valor del factor de potencia de desplazamiento con la conexión de siete capacitores, siendo este valor FP = 0.971, es decir, ingresa carga capacitiva al circuito lo que permite disminuir la carga inductiva mejorando el factor de potencia. (Fig. 4.3).

En la Figura 4.4 se encuentra las ondas de voltaje y corriente después de ser corregido por los capacitores, el desplazamiento de la onda de corriente de esta figura se ha reducido con respecto a la onda de corriente de la Fig. 4.2

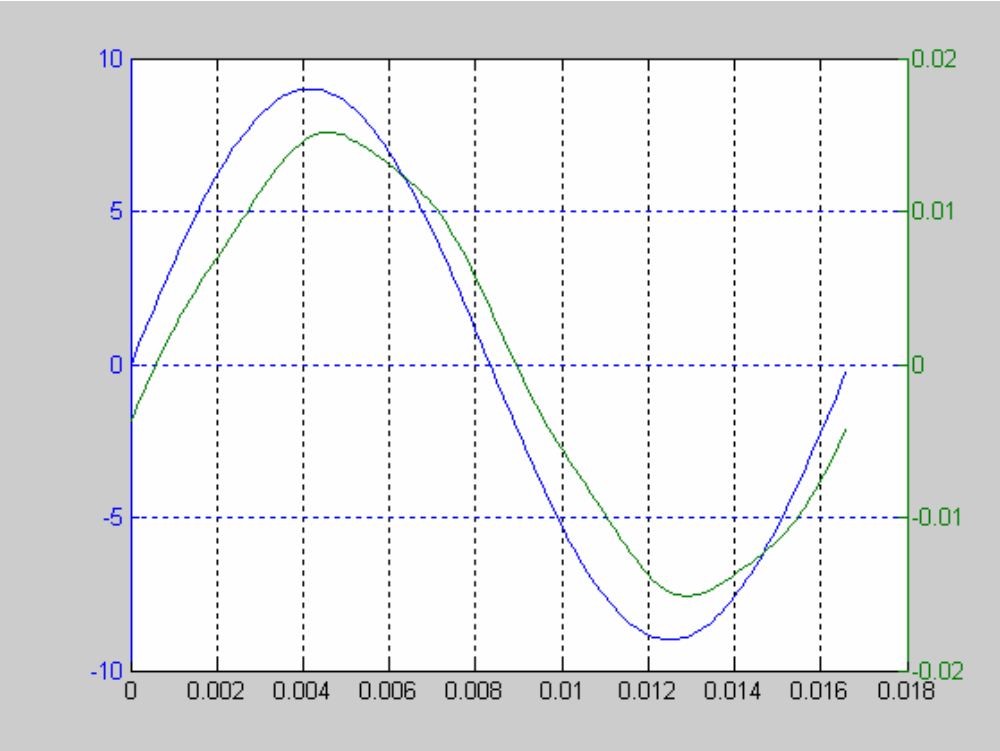

Fig. 4.4 Ondas de Voltaje (azul) y Corriente (verde) corregido el factor de potencia.

4.1.2 CASO B: Resistencia de 300Ω y Reactancia Inductiva de 150Ω

Adquisición de datos del sistema sin la conexión de capacitores

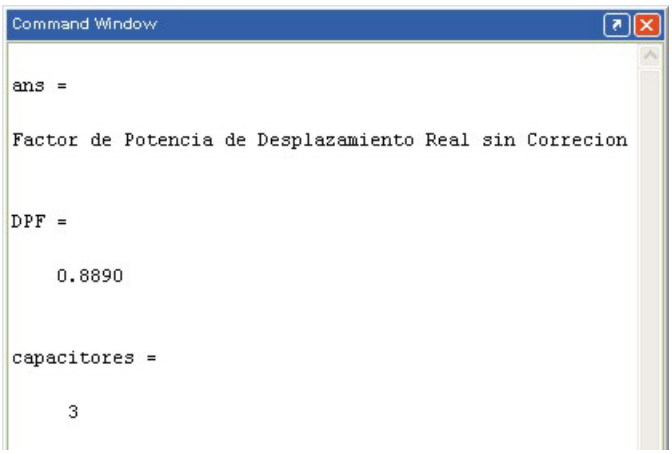

Fig. 4.5 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento y Número de Capacitores a conectarse.

El programa del sistema difuso con los datos adquiridos de voltaje y corriente, encuentra el valor del factor de potencia producida por la bobina de aproximadamente 0.889, el sistema difuso indica que deben encenderse tres capacitores. (Fig. 4.5).

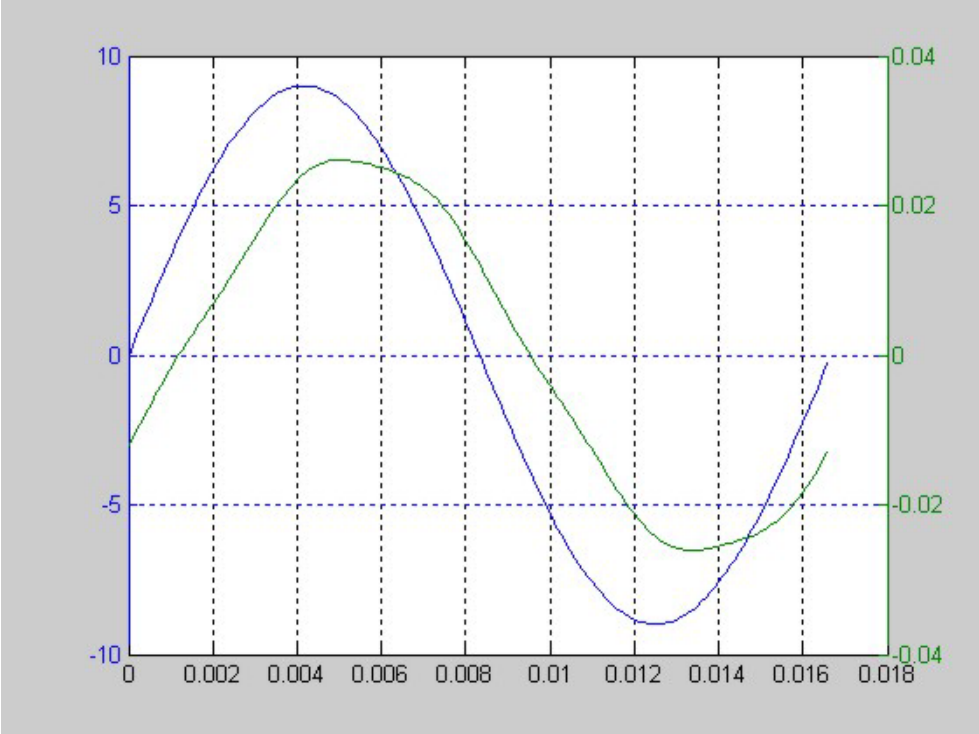

Fig. 4.6 Ondas de Voltaje (azul) y Corriente (verde) sin corregir el factor de potencia.

En la Figura 4.6 se observa las ondas de voltaje (azul) y corriente (verde), entre las cuales existe un desplazamiento ***(Factor de Potencia de desplazamiento).***

Adquisición de datos del sistema con la conexión de capacitores

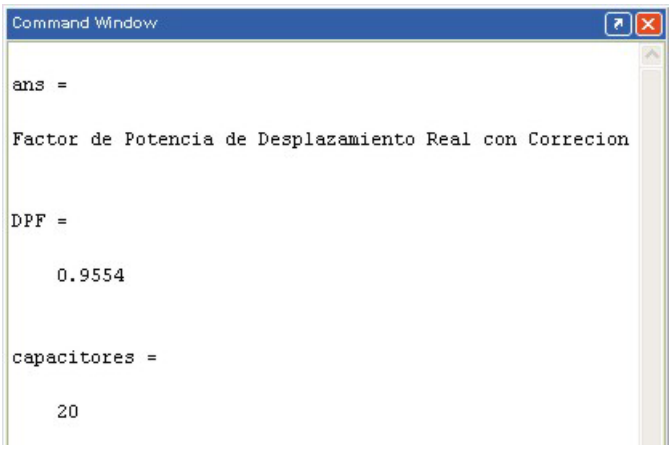

Fig. 4.7 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento conectado los capacitores.

El programa del sistema difuso con los datos adquiridos de voltaje y corriente, calcula el nuevo valor del factor de potencia de desplazamiento con la conexión de siete capacitores, siendo este valor FP = 0.955, es decir, ingresa carga capacitiva al circuito lo que permite disminuir la carga inductiva mejorando el factor de potencia. (Fig. 4.7).

En la Figura 4.8 se encuentra las ondas de voltaje y corriente después de ser corregido por los capacitores, el desplazamiento de la onda de corriente de esta figura se ha reducido con respecto a la onda de corriente de la Fig. 4.6

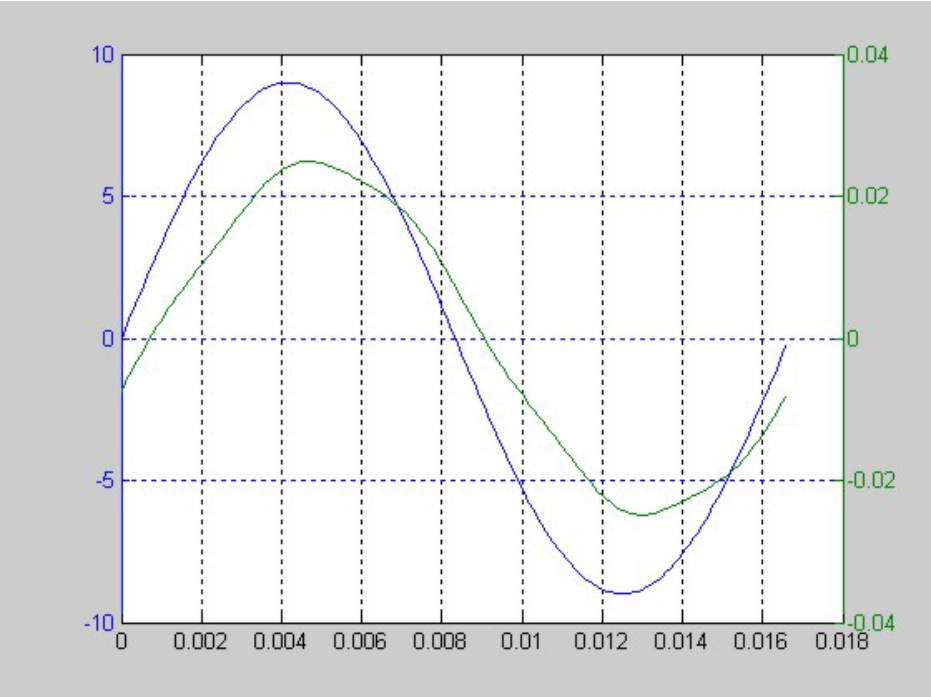

Fig. 4.8 Ondas de Voltaje y Corriente corregido el factor de potencia.

4.1.3 CASO C: Resistencia de 300Ω y Reactancia Inductiva de 100Ω

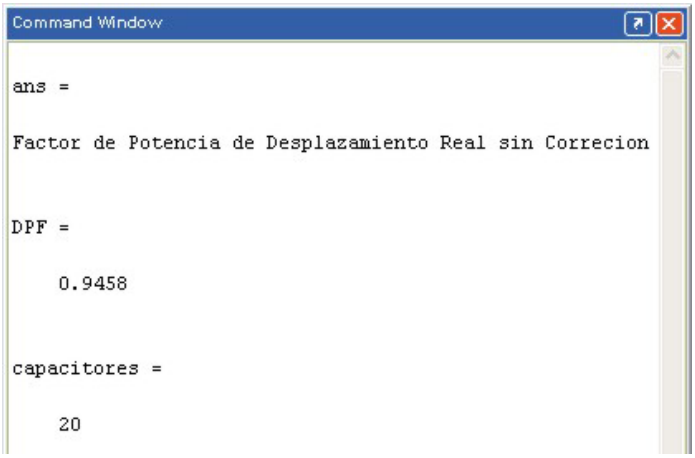

Fig. 4.9 Valor del Factor de Potencia de Desplazamiento, no necesita conectar los capacitores.

Al observar la simulación se encuentra que el factor de potencia producida por la bobina es de aproximadamente 0.949, el sistema difuso indica que todos deben estar apagados (Fig. 4.9).

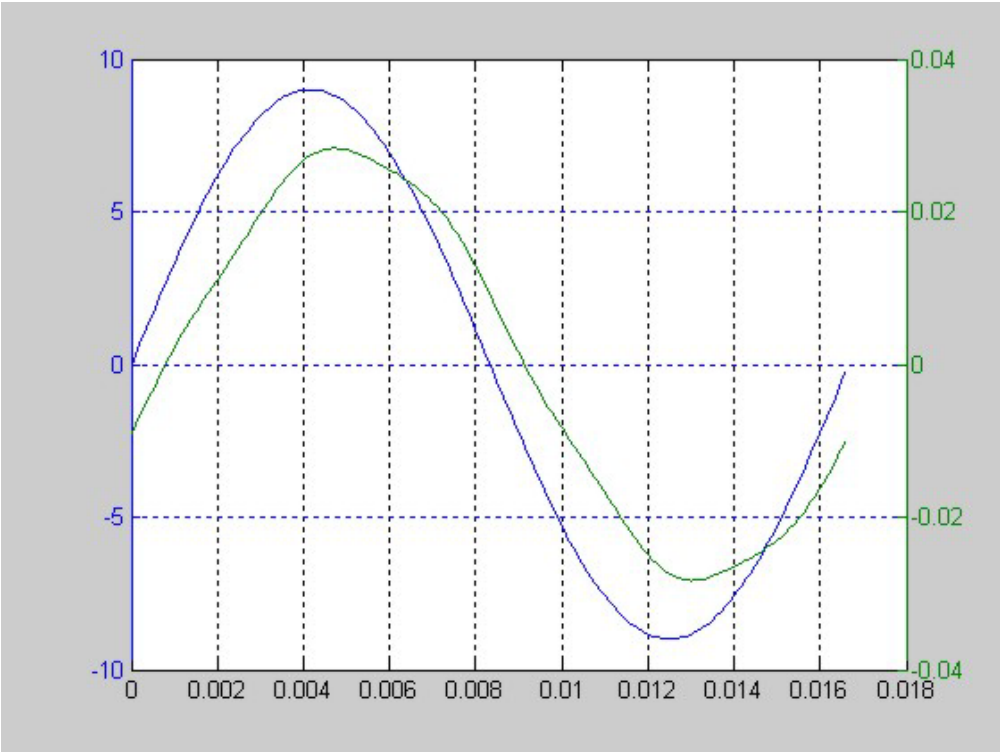

Fig. 4.10 Simulación de las ondas de Voltaje y Corriente no necesita corregir el factor de potencia.

En la Figura 4.10 se observa las ondas de voltaje y corriente, entre las cuales existe un desplazamiento mínimo ya que se acerca al valor de 1 ***(Factor de Potencia).***

4.1.4 Análisis del Factor de Potencia de Desplazamiento Sin Corrección

A continuación la Tabla 4.1, contiene datos comparativos de los valores simulados y reales del factor de potencia de desplazamiento.

R(Ω)	XL(Ω)	DPFsim	DPFreal	Error=((DPFsim-DPFreal)/DPFsim*100%)
300	300	0,7065	0,6964	1,4296%
300	150	0,8935	0,889	0,5036%
300	100	0,9485	0,9458	0,2847%

Tabla 4.1 Datos del Factor de Potencia de Desplazamiento Simulado, Real sin corrección.

Al observar la tabla se encuentra que los valores simulados y reales varían, porque en la parte simulada se tiene elementos ideales en donde si se toma una bobina esta tiene solo valores de inductancia, mientras que la misma bobina en forma real es una combinación de resistencia, capacitancia e inductancia, en donde la inductancia es muchísimo mayor que las dos anteriores, como esta es la que predomina en el bobinado se puede calcular la reactancia inductiva, y esta reactancia es la que cambia el valor del factor de potencia. Además el bobinado depende de otros parámetros como son la frecuencia de la red de distribución eléctrica, la temperatura del bobinado cuando esta trabajando, la tolerancia que indica el fabricante, etc. Por lo tanto todos estos parámetros hacen que el valor del factor de potencia varíe y se tenga una diferencia entre la parte simulada y la real.

4.1.5 Análisis del Factor de Potencia de Desplazamiento Con Corrección

R(Ω)	XL(Ω)	DPFsim	DPFreal	Error=((DPFsim-DPFreal)/DPFsim*100%)
300	300	0,969	0,9706	0,1651%
300	150	0,957	0,9554	0,1672%
300	100	0,9485	0,9458	0,2847%

Tabla 4.2 Datos del Factor de Potencia de Desplazamiento Simulado, Real corregido.

Al observar la tabla 4.2 se encuentra que los valores simulados y reales varían, porque en la parte simulada se tiene elementos ideales en donde si se toma una bobina esta tiene solo valores de inductancia, mientras que la misma bobina en forma real es una combinación de resistencia, capacitancia e inductancia, en donde la inductancia es muchísimo mayor que las dos anteriores, como esta es la que predomina en el bobinado se puede calcular la reactancia inductiva, y esta reactancia es la que cambia el valor del factor de potencia. Para mejorar el factor de potencia ingresan o se conectan en paralelo a la carga condensadores o capacitores, los cuales como se explicó anteriormente, no son elementos ideales sino son la combinación de tres elementos, con el predominio de uno de ellos, en este caso es la capacitancia. Y también este varía con la frecuencia de la red de distribución eléctrica, la temperatura de trabajo del capacitor, la tolerancia que indica el fabricante, etc. Por lo tanto todos estos parámetros hacen que el valor del factor de potencia varíe y se tenga una diferencia entre la parte simulada y la real.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Del desarrollo de esta tesis se puede concluir que:

- Se desarrolló un prototipo que permite realizar el análisis y control del factor de potencia, para una empresa de distribución eléctrica, el cual decide cuando y cuanto controlar el factor de potencia, dentro de un rango adecuado, esta "decisión" es tomada por medio de la lógica difusa.
- El tiempo de ejecución del prototipo es en tiempo real, es decir que adquiere los datos y decide la cantidad de condensadores que deben conectarse para controlar el factor de potencia rápidamente; mientras que, para hacer el mismo trabajo sin la ayuda del sistema es necesario recopilar los datos por un período de tiempo no menor a un año y establecer los horarios de conexión y desconexión para garantizar que el factor de potencia se mantenga dentro de un rango aceptable, sin que el resultado sea preciso sino solo un aproximado en base a los cálculos estadísticos que se posean.
- La lógica difusa toma las decisiones apropiadas de manera similar al comportamiento humano, pero estas decisiones se basan en los conocimientos de los expertos en el tema, por lo tanto su exactitud dependerá solamente de los parámetros con los que se programe su funcionamiento.

- La lógica difusa controla del factor de potencia basándose solamente en la relación de desplazamiento que exista de la onda de corriente con respecto a la de voltaje, por lo que si se quiere comparar el prototipo frente a un sistema real la única diferencia serán los voltajes y corrientes aplicados a estos elementos, los cuales dependerán del lugar donde se lo vaya a aplicar.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para que la automatización se lleve a cabo de manera adecuada es recomendable usar sensores electrónicos o eléctricos exactos y precisos para que el error de medida sea mínimo, puesto que si este margen es muy grande ocasionará que el factor de potencia calculado no sea el óptimo y al activar el control exista la posibilidad de sobrepasar el límite máximo o no llegue al límite mínimo establecido para el factor de potencia.
- Para llegar a establecer el factor de potencia que genera el lugar donde se va a aplicar este sistema, es recomendable realizar mediciones al menos por 15 días consecutivos y en lo posible lograr que la empresa trabaje con toda su maquinaria a plena carga durante este lapso de tiempo, una vez que se pueda definir el rango del factor de potencia con los datos recopilados, se toma el peor de ellos para calcular el número mínimo de capacitores que se van a necesitar para efectuar el control.
- Luego de la investigación realizada, se recomienda usar lógica difusa cuando no se conozca el modelo matemático de un sistema, cuando exista incertidumbre en los datos y/o resultados, no sea lineal su comportamiento, o cuando se requiera llegar al límite óptimo predefinido con mayor rapidez a través de sistemas expertos.
- Para la ejecución real del presente trabajo se utilizarán microcontroladores y de acuerdo con los estudias realizados se recomienda usar funciones de membresía triangulares y trapezoidales para la aplicación de lógica difusa lo que permite que el sistema tome la decisión de manera oportuna e inmediata, ya que su cálculo matemático es rápido y sencillo, en especial cuando la velocidad de procesamiento en el microcontrolador es vital para realizar el control.
- Es primordial verificar la velocidad de trabajo de los circuitos integrados para que no existan conflictos entre ellos, al momento de realizar la adquisición de datos.

5.3 BIBLIOGRAFÍA

- **JANG, Roger – GULLEY, Ned: "**User's Guide Fuzzy Logic Toolbox"
- **HAYT, William y KEMMERLY, Jack:** "Análisis de Circuitos en Ingeniería", Mc Graw Hill, Madrid, 1966.
- **BRENNER, Egon y JAVID, Manssur:** "Análisis de Circuitos Eléctricos", McGraw Hill, México, 1978.
- **EDMINISTER, Joseph A.:** Circuitos Eléctricos. Teoría y 350 problemas resueltos, Mc Graw Hill - Schaum, México, 1970
- **NILSSON, James W.:** Circuitos Eléctricos, Addison-Wesley Iberoamericana, Estados Unidos, 1995.
- **ARRILLAGA, J. – EGUÍLUZ, L.I.:** "Armónicos en Sistemas de Potencia". Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. Santander, 1994.
- **J. CONEJO, A. CLAMAGIRAND, J. L. POLO, N. ALGUACIL.:** Circuitos Eléctricos para la Ingeniería. Ed. Mc Graw Hill
- **J.W. NILSSON.:** Circuitos Eléctricos. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana
- **MOHAN, Undeland: "**POWER ELECTRONICS. CONVERTERS, APPLICATIONS AND DESIGN", 2ª edición, 1995. Ed. John Wiley & sons.
- **HART, Daniel W.:** "INTRODUCTION TO POWER ELECTRONICS", 1997. Ed. Prentice-Hall.
- **MUHANMAD H. Rashid:** "POWER ELECTRONICS. CIRCUITS, DEVICES AND APPLICATIONS", 2ª edición, 1993, Ed. Prentice-Hall.

5.4 PÁGINAS ELECTRÓNICAS

- http://personales.ciudad.com.ar/montajesindustriales/index.html
- http://www.aener.com
- http://www.ingelectricista.com.ar/cosfi.htm

ANEXOS