



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA
MOA – HOLGUÍN

Trabajo de Diploma

En Opción al Título de Ingeniero Eléctrico

*TÍTULO: Compensación de Potencia Reactiva en el
Combinado Lácteo de Las Tunas.*



Autor: Alberto Pérez Baldonado

Tutor: Msc. Ileana González Palau

Moa, 2009
Año del 50 aniversario del triunfo de la Revolución

DECLRACION DE AUTORIDAD

Yo Alberto Pérez Baldonado autor del trabajo de diploma “Compensación de Potencia Reactiva en el Combinado Lácteo provincial de Las Tunas vía Algoritmos genéticos” certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero- Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes, educativos e investigativos.

PENSAMIENTO

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einstein.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la revolución y a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido con la realización de este trabajo y nuestra formación como profesional.

En especial a mi tutora la Msc. Ileana González Palau por el apoyo brindado en la confección de este trabajo.

Por último quiero agradecer profundamente a mis padres, familiares, amigos y otros que demostraron su apoyo incondicional, confianza y amistad, porque siempre han estado a mi lado en los buenos y malos momentos. A mis compañeros de cuarto con los cuales conviví estos 5 años de universidad.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a mis padres Alina Baldonado Pupo y Alberto Pérez Milán, a todo ellos por su apoyo y por que me han brindado lo mejor de ellos en todos los momentos de mi vida y en mi preparación como profesional.

RESUMEN

El bajo factor de potencia es un problema que podemos encontrar a menudo en la industria, mejorarlo para reducir los costos asociados a la factura eléctrica es un constante dilema. Varios son los métodos de cálculo para calcular el capacitor a instalar, uno de ellos lo constituye los algoritmos genéticos, estos se encuadran dentro de la clase de algoritmos que presentan ciertas analogías con los procesos biológicos de la naturaleza. Están incluidos, por tanto, en el marco de la Bioinformática, área de especialización encargada de estudiar modelos y técnicas basándose en patrones biológicos y aprovechando las metodologías y técnicas informáticas. La bioinformática, trata de dar solución a una gran variedad de problemas de un amplio dominio científico y por ende al problema que nos ocupa.

En el Capítulo I, se establece el Marco Teórico de la Investigación; en él, se realiza una caracterización de la empresa, analizándose la estructura, componentes eléctricos de esta y el comportamiento de la energía mediante los gráficos de carga.

En el capítulo II, se dan a conocer los métodos para la determinación del factor de potencia tanto con los métodos convencionales como por métodos de la computación evolutiva, escogiendo los algoritmos genéticos.

En el Capítulo III, se da a conocer como se obtienen los resultados por **Algoritmos Genéticos** (AG), su análisis y aplicamos las herramientas antes establecidas en el esclarecimiento de fundamentos de la práctica de la ingeniería la industria y una valoración científico social y económico del trabajo.

SUMMARY

The low power factor is a problem that we can find often in the industry, to improve it to reduce the associated costs to the electric invoice it is a constant dilemma. Several they are the methods of I calculate to calculate the capacitor to install, one of them constitutes it the genetic algorithms, these they are framed inside the class of algorithms that present certain analogies with the biological processes of the nature. They are included, therefore, in the mark of the Bioinformática, area of in charge specialization of studying models and techniques being based on biological patterns and taking advantage of the methodologies and computer techniques. The bioinformática, tries to give solution to a great variety of problems of a wide one I dominate scientific and for ende to the problem that occupies us.

In the Chapter I, the Theoretical Marco of the Investigation settles down; in him, is carried out a characterization of the company, in the the structure and electric components are analyzed, the behavior of the energy is analyzed by means of the load graphics.

In the chapter II, are given to know the methods for the determination of the so much power factor with the conventional methods as for methods of the evolutionary calculation, choosing the genetic algorithms.

In the Chapter III, it is given to know like the results are obtained by AG, their analysis and we apply the tools before settled down in the clarification of foundations of the practice of the engineering the industry and a valuation social and economic scientist of the work.

ÍNDICE

INTRODUCCION GENERAL.....	1
FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
CAPITULO 1: Marco Teórico	5
1.1 Estado del arte. Trabajos precedentes.....	6
1.2 Caracterización de la Empresa.	9
1.2.1 Caracterización del sistema eléctrico de la empresa.	10
1.2.2 Régimen de trabajo del transformador de distribución.	11
1.2.3 Levantamiento de la carga.	12
1.2.4 Variaciones del consumo de energía. Gráficos de carga.	14
1.3 Métodos para la determinación del factor de potencia en una instalación.	19
1.3.1 Características del Analizador de redes utilizado.	21
1.4 Conclusiones del capítulo	23
CAPITULO 2: Compensación de la potencia reactiva	24
2.1 Factor de potencia.....	25
2.2 Inconvenientes de un bajo factor de potencia.	26
2.3 Métodos de corrección del factor de potencia.....	29
2.4 Ventajas de corregir el factor de potencia.	32
2.5 Métodos de cálculo de la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia.....	35
2.6 Consideraciones para la localización de los capacitores.	37
2.7 Significado de la compensación en redes de alimentación.	40
2.8 Control de los bancos de capacitores.	41
2.9 Tipos de compensación.....	43
2.10 Selección del método a implementar para la corrección del factor de potencia.....	48
CAPITULO 3: Aplicación del método seleccionado	49
3.1 Aspectos generales de los algoritmos genéticos	50
3.1.1 Breve historia de los algoritmos genéticos.	50
3.1.2 Introducción a los Algoritmos Genéticos.....	53
3.1.3 ¿Qué es un algoritmo genético?.....	53
3.1.4 Estructura y componentes básicos de los algoritmos genéticos. ...	55
3.1.5 Terminología:.....	56
3.1.6 Procedimientos básicos de un algoritmo genético.	57
3.1.7 Elitismo.	59
3.1.8 Métodos de cambio.	60
3.2 El problema de la optimización de la compensación reactiva en sistemas eléctricos. Aplicación con MATLAB.....	61
3.2.1 Dispositivos que influyen en el balance de potencia reactiva.	61
3.2.2 Metodología de optimización.	61
3.3 Aplicación de Algoritmo Genético a la determinación óptima del banco de capacitores en la empresa de productos lácteos de las tunas.	62
3.3.1 Formulación Global del Problema.....	62
3.3.2 Validación del Modelo.....	65
3.4 Valoración económica del proyecto.....	69
3.4.1 Elementos de la Tarifa.	71

3.5 Conclusiones del capítulo.....	80
Conclusiones Generales.....	81
Recomendaciones	82
Bibliografía.....	83
ANEXOS.....	i

INTRODUCCION GENERAL

Los recursos energéticos son el conjunto de medios con los que los países del mundo intentan cubrir sus necesidades de energía. La energía es la base de la civilización industrial; sin ella la vida moderna dejaría de existir. Durante la década del setenta, el mundo empezó a ser consciente de la vulnerabilidad de los recursos energéticos. A largo plazo es posible que las prácticas de conservación de energía proporcionen el tiempo suficiente para explorar nuevas posibilidades tecnológicas. Mientras tanto, el mundo seguirá siendo vulnerable a trastornos en el suministro de petróleo, que después de la II Guerra Mundial se ha convertido en la principal fuente de energía. Cuba, al igual que la mayoría de los países insulares, carece de recursos energéticos y satisface la mayor parte de sus necesidades para el transporte, la transformación y en menor medida para la producción de electricidad con la importación de combustibles fósiles. Esta dependencia de los combustibles fósiles es general en el mundo contemporáneo. Aún cuando se alcancen altos niveles de participación de las fuentes nacionales de energía en el balance energético nacional, los combustibles convencionales (gas y petróleo) mantendrán su aporte determinante dentro del contexto nacional y seguirá la dependencia de combustibles importados para determinados sectores. Por el papel que para el crecimiento del país tiene el desarrollo del sector energético, por las implicaciones que para el medio ambiente tiene el uso de los combustibles fósiles, por su agotabilidad y por la dependencia económica que cada día es mayor debido a la subida de los precios de los combustibles importados, es de vital importancia para el país la formación de una cultura general en la población que favorezca, unido al incremento de la eficiencia energética y del uso de las fuentes renovables de energía, la sostenibilidad del crecimiento del país.

En Cuba, como la mayor parte de los países de nuestro continente enfrenta varios desafíos, siendo probablemente el más importante el referido a su integración en la economía mundial, para lo cual requiere elevar cada vez más, su nivel de competitividad.

Durante los últimos años el estado cubano ha efectuado una reforma económica, que viene empujando la modernización de nuestro país. Una de esas medidas ha consistido en el sinceramiento del mercado energético, teniéndose en la actualidad los precios y las tarifas en sus valores reales. Esto, sumado al logro de una menor inflación y devaluación, permite que la población y los agentes productivos y servicios puedan realizar acciones de ahorro de energía, y ver los frutos de sus esfuerzos, que de no haber una estabilidad económica no podrían percibirse.

Desde el año 2000, el Ministerio de industria básica (MINBAS) viene desarrollando una campaña informativa de ahorro de energía muy intensa a nivel del sector residencial, que tiene como objetivo la mejora de los hábitos de consumo de la población y la inducción al uso de equipos eficientemente energéticos, habiéndose obtenido hasta la fecha resultados muy favorables para el país.

A nivel del sector productivo y de servicios, el objetivo es lograr el desarrollo de los programas de ahorro de energía a través de la formación y dinamización de un mercado de eficiencia energética, cuyo motor sea las propias fuerzas del mercado. En ese mercado, el lado de la demanda de servicios de eficiencia energética lo constituyen las empresas industriales – comerciales.

FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Situación Problemática.

Desde la construcción y puesta en marcha de la empresa de productos lácteos de las Tunas, se ha estado penalizando dicha entidad por parte de la Empresa eléctrica (OBE), debido a su bajo factor de potencia, esto está condicionado desde sus inicios por la falta de un banco de capacitores o de otros elementos que contribuyan a llevar a valores deseados la potencia reactiva y con ello elevar su factor de potencia. Esta mala eficiencia esta condicionada además por la existencia de lámparas de 40 W, las cuales permanecen encendidas 24 horas, la presencia de motores Asíncronos sobredimensionados operando con un bajo rendimiento.

Hipótesis.

Si se conoce el comportamiento de las cargas y se compensa la potencia reactiva en la empresa de productos lácteos de las Tunas, entonces se puede disminuir los costos por la sobrefacturación debido a los recargos recibidos, y mejoraran los indicadores económicos de la empresa, logrando una mejor regulación de voltaje.

Objetivo General.

Mejorar el factor de potencia y con ello elevar la eficiencia energética de la empresa, para reducir los costes por facturación eléctrica, mediante la implementación de los algoritmos genéticos.

Resultados esperados.

Los resultados esperados al corregir el factor de potencia a niveles óptimos, serian:

- **Un menor costo de energía eléctrica.**

Al mejorar el factor de potencia no se tiene que pagar penalizaciones por mantener un bajo factor de potencia, sino que en dependencia del factor de potencia se puede lograr la bonificación por parte de la empresa eléctrica (OBE).

- **Aumento en la capacidad del sistema.**

Al mejorar el factor de potencia se reduce la cantidad de corriente reactiva que inicialmente pasaba a través de transformadores, alimentadores, tableros y cables, y con ello su costo asociado.

- **Mejora en la calidad del voltaje.**

Un bajo factor de potencia puede reducir el voltaje de la planta, cuando se toma corriente reactiva de las líneas de alimentación. Cuando el factor de potencia se reduce, la corriente total de la línea aumenta, debido a la mayor corriente reactiva que circula, causando mayor caída de voltaje a través de la resistencia de la línea, la cual, a su vez, aumenta con la temperatura. Esto se debe a que la caída de voltaje en una línea es igual a la corriente que pasa por la misma multiplicada por la resistencia en la línea.

- **Disminución de pérdidas en el sistema de suministro eléctrico.**

Al mejorar el factor de potencia traería consigo la disminución de la potencia reactiva y con ello la disminución de la corriente inductiva que pasa a través de los conductores, logrando así una disminución en las pérdidas de energía en los conductores.

CAPITULO 1: Marco Teórico

- 1.1 Estado del arte en la ubicación óptima de capacitores para la corrección del factor de potencia.**
- 1.2 Caracterización de la empresa.**
- 1.3 Métodos para la determinación del factor de potencia en una instalación.**
- 1.4 Conclusiones del capítulo.**

INTRODUCCIÓN

La reducción de la demanda, del consumo de energía, de los costos asociados con ellos y con las inversiones capitales en los equipos eléctricos utilizados en las instalaciones industriales y de servicio, resulta imprescindible en la situación actual de la economía de nuestro país. Esta necesidad resulta potenciada por el impacto medioambiental de las tecnologías energéticas.

Reducir la factura mensual de la compañía eléctrica es un desafío continuo. Para muchas plantas industriales reducir costes eléctricos significa limitar el pico de demanda o instalar sistemas de ahorro de energía, varias son las medidas para el ahorro en sistemas eléctricos de empresas industriales, pero hay una parte de la factura que puede ser reducida sin alterar la utilización de la energía. El factor de Potencia representa una parte muy significativa de la factura para muchas empresas, y es todavía, uno de los costes más frecuentemente controlable. Además los factores de potencia desfavorables aumentan los costes del sistema de potencia de otras maneras. Este trabajo trata sobre todas las ventajas de instalar condensadores para corregir el factor de potencia.

No se estudian otras medidas que también conducen al ahorro en los sistemas eléctricos, como la ubicación adecuada de subestaciones y centros de control de motores, la selección correcta del calibre de los conductores o la determinación de los mejores niveles de tensión, ya que ellas suelen requerir de importantes remodelaciones e inversiones que, salvo en el caso de nuevas

instalaciones o ampliaciones, resultan difíciles de implementar o, en muchos casos, no son rentables. En la inmensa mayoría de los casos, de lo que se trata es de lograr ahorros en sistemas ya construidos, y sin realizar grandes inversiones.

Son conocidos los problemas causados por un bajo factor de potencia en sistemas eléctricos, como son la regulación de voltajes, funcionamiento inadecuado de máquinas y aumento de pérdidas, lo que en definitiva se traduce en una reducción de la capacidad y eficiencia eléctrica del sistema. La solución ampliamente utilizada ha sido la instalación de bancos de condensadores para la compensación de potencia reactiva.

Operar con bajo factor de potencia una instalación eléctrica, además del impacto en el pago de electricidad, tiene otras implicaciones de igual o mayor significación, particularmente en relación con la capacidad de los equipos de transformación y distribución de la energía eléctrica y con el uso eficiente de la máquinas y aparatos que funcionan con electricidad.

El concepto del factor de potencia, los efectos que se presentan cuando su valor es reducido y los métodos para corregirlo, no son temas nuevos. Sin embargo, su análisis es un problema permanente y de obligada importancia para todos aquellos cuya actividad se relaciona con la operación eficiente de las instalaciones eléctricas industriales y el ahorro de energía. La mayoría de las cargas industriales son de naturaleza inductiva y ellas precisamente son el origen del bajo factor de potencia.

1.1 Estado del arte. Trabajos precedentes.

Desde hace unos años, se está registrando en todos los países industrializados una creciente sensibilidad hacia la “calidad del producto electricidad” o, dicho de otra forma, hacia la “calidad de energía”.

Las alteraciones de la “calidad de la energía” tienen lugar en los propios procesos de producción, transporte y distribución, así como en su utilización por determinados tipos de receptores. Son, por lo tanto, inevitables. Sin embargo, sólo en los últimos años se están convirtiendo en un motivo de preocupación. Y ello, por dos causas:

- Por un lado, los procesos industriales requieren, de día en día, una mayor calidad de todos los productos utilizados y, en particular, de la electricidad, haciéndose más sensibles a las alteraciones que puedan existir.
- Por otro lado, la creciente utilización de receptores que generan perturbaciones hace que el nivel de contaminación general de las redes eléctricas esté aumentando, lo que puede así incidir en el normal funcionamiento de los demás receptores a ellas conectados y, en definitiva, extendiendo el problema.

La eficiencia energética refleja la proporción de energía que se invierte realmente en la fabricación de un producto y que no se pierde por causa de rendimientos insuficientes de los equipos utilizados o por disipación térmica. Se trata, por tanto, de un concepto susceptible de mejora que redundará en un ahorro energético, que unido a una potenciación del uso de los recursos renovables se acerca más a una gestión sostenible de nuestro planeta. El aumento de la eficiencia energética durante los próximos veinte años permitirá que “la cantidad de energía primaria requerida para un servicio dado pueda ser reducida, de forma rentable, entre 25 y 35 % en los países industrializados”. Y el ahorro podría llegar hasta 45 % en los países en desarrollo donde existen máquinas y equipamientos obsoletos. Es decir, se podrá seguir funcionando como hasta ahora con la mitad o, al menos, dos terceras partes de la energía que se emplea en la actualidad. Muchos son las investigaciones dirigidas a este tema de gran importancia, en nuestro país se han creado varios grupos de trabajo que se dedican al estudio de este problema. Un factor muy importante en el ahorro de energía en distribución lo constituye el factor de potencia, por los problemas que este ocasiona, tanto en el sistema eléctrico como en la factura eléctrica mensual del consumidor. Entre los trabajos realizados en esta temática se encuentran:

Estrada, G. H; Tovar, J. H¹. En 2005 [1] propone una metodología para la localización óptima de condensadores en sistemas eléctricos de distribución. La metodología propuesta para la obtención del esquema de compensación

¹ ESTRADA, G. H; TOVAR, J. H. Metodología para la localización óptima de condensadores Mediante Sensibilidades Lineales.

considera tanto el aspecto técnico como el económico. Técnicamente, una acción de compensación se acepta cuando reduce las pérdidas. El aspecto económico restringe cada acción aceptada técnicamente para que esta sea rentable. Para evitar soluciones no aplicables y considerar costos reales de bancos, sólo capacidades comerciales de estos son consideradas en este trabajo. Para evaluar las diferentes alternativas económicas, se hace uso del método de valor presente. Se presentan ejemplos con sistemas de distribución de diferente tamaño a fin de discutir la metodología propuesta.

Viego, P.F; de Armas, M.A². En 2006[2] expone los factores que influyen en la calidad de la energía y como prevenirlos, se abarca un capítulo completo para el mejoramiento del factor de potencia, pues este es uno de los factores que mas problemas ocasiona en la industria y es el mas fácil de corregir, en el se abordan varios métodos para corregir el factor de potencia pero no se tiene en cuenta a la hora de realizar el balance económico el gasto por la mano de obra en la instalación del elemento compensador.

Romeu, R.A; de la fe, D.S³. En 2008[3] propone una metodología para la selección óptima de capacitores y su ubicación para la mejora del factor de potencia pero por medio de la inteligencia artificial, usando algoritmos genéticos, el cual resuelve problemas con un alto grado de complejidad pero con un resultado excelente. En se tiene en cuenta la disminución de las perdidas, el costo de los capacitores y de la mano de obra, propone 2 variantes en diferentes circuitos, obteniendo resultados excelentes.

López, M.J⁴. En 2004[4] expone las causas, efectos y soluciones del factor de potencia, este aborda el efecto de los convertidores electrónicos y cargas no lineales en específico, no aborda mucho las cargas lineales sino que se centra en los convertidores electrónicos, los cuales son muy usados en la industria y causan un efecto indeseado en el sistema de distribución de la energía de la empresa.

² VIEGO, P. F; ARMAS, M. A de. *Temas Especiales de Sistemas Eléctricos Industriales*.

³ ROMEU, R. A; *Aplicación de MATLAB para la compensación de potencia reactiva en redes de distribución de energía vía algoritmos genéticos*

⁴ LÓPEZ, M. J. *Las perturbaciones armónicas y los niveles de CEM en relación a la corrección del factor de potencia*.

Viego, P.F; de Armas, M.A⁵ En 2006[5] expone los problemas que causa un bajo factor de potencia sobre los conductores y transformadores; además expone el problema de los motores asincrónicos sobre este, aborda el tema de la tarifa eléctrica y de como esta se ve afectada por el factor de potencia. Carrillo, G; Gabriel, C.O⁶. en 2001[6] propone una metodología mediante algoritmos genéticos para la selección de capacitores, además expone el efecto de la potencia reactiva sobre conductores y transformadores. En este trabajo no se tienen en cuenta elementos como las variaciones voltajes, sino que se centra en la mejora del factor de potencia solo con fines de la bonificación por parte de la empresa eléctrica.

En general todos los problemas de ubicación óptima de capacitores en sistemas de distribución buscan obtener la cantidad, (fija o conmutable), ubicación y capacidad de los mismos, de manera que compensen la potencia reactiva para la obtención de la disminución de las pérdidas y se mejoren los indicadores de eficiencia del sistema.

1.2 Caracterización de la Empresa.

El Combinado Lácteo de Las Tunas se encuentra ubicado en el municipio de este mismo nombre, en el Km. 2 ^{1/2} de la carretera circunvalante e esta ciudad. Su objetivo social fundamental, desde su puesta en marcha en el año 1986, radica en la fabricación de productos lácteos a partir de los derivados de la soya y la leche para el consumo de la población, de la merienda escolar, la cual esta insertada en los programas de la revolución y en general a todos los consumidores que reciben este producto a través de esta empresa.

La empresa tiene como objetivos principales:

- La producción, distribución y comercialización a las diferentes instituciones y a la población de yogurt, quesos, leche saborizada y otros productos lácteos en moneda nacional y moneda libremente convertible.

⁵ VIEGO, P. F; Armas, M. A de. *Sistemas Eléctricos Industriales*.

⁶ CARRILLO, G; GABRIEL, C. O. *Metodología integral para la compensación de la potencia ficticia en sistemas de distribución de energía eléctrica*.

- Comercializar de forma mayorista las producciones del resto de las entidades de la unión láctea en moneda nacional y convertible.
- Brindar servicios gastronómicos a los trabajadores de la entidad y al sistema en moneda nacional.
- Efectuar la venta a trabajadores de las entidades del sistema de la industria alimenticia los excedentes de las producciones y el autoconsumo de los productos lácteos, cárnicos y agrícolas en moneda nacional.

1.2.1 Caracterización del sistema eléctrico de la empresa.

Antes de realizar el análisis de cualquier circuito eléctrico y de buscar alternativas de ahorro de energía se hace preciso caracterizar de manera global el suministro de energía eléctrica en la instalación objeto de análisis. La Empresa de Productos Lácteos de las Tunas es un cliente que aunque no lo es, se puede considerar de primera categoría, teniendo en cuenta que la ausencia de electricidad implicaría pérdidas o daños considerables a la economía del país, ya que esta insertada en los programas de la Revolución y en La Batalla de Ideas, razón por la cual su sistema de suministro eléctrico no esta diseñado para permitir interrupciones de energía eléctrica en su sistema de distribución, por lo que cuenta además con un grupo electrógeno HEIMER de 618 kVA que le brinda energía en caso de una emergencia. La energía eléctrica proviene de un solo punto de alimentación, del circuito TK24, llega a la subestación de la empresa y es transformada por un banco de transformadores de 750 Kva, sumergido en aceite, el cual es el encargado de garantizar el suministro a los 8 ramales en los que divide el sistema dentro de la empresa. La empresa cuenta con un circuito de distribución radial independiente lo que posibilita una mayor confiabilidad en el sistema y una mejor regulación de tensión. La entidad tiene contratada a la empresa eléctrica una demanda máxima de 455 kW, pero su pico máximo de demanda es según datos históricos de 324 kW, por lo que la demanda máxima contratada esta por encima de los valores que en estos momentos esta consumiendo la empresa, la cual tiene un valor promedio de 180 kW.

1.2.2 Régimen de trabajo del transformador de distribución.

El transformador es uno de los dispositivos eléctricos más utilizados, fundamentalmente en relación con la transmisión y distribución de la energía eléctrica. La transportación de la energía eléctrica a grandes distancias requiere de voltajes elevados para lograr una alta eficiencia. No obstante, es necesario reducir considerablemente tales niveles de voltajes a magnitudes que permitan su utilización práctica sin que exista riesgo para la vida de los consumidores. Los transformadores son equipos imprescindibles en los sistemas industriales debido a que transforman toda la potencia recibida de la red de suministro al nivel de voltaje requerido por el consumidor final. En varias ocasiones no se dispone de un transformador trifásico o no se justifica su uso y para el servicio trifásico se emplean tres transformadores monofásicos que pueden ser de iguales o diferentes características.

En la empresa de productos lácteos de las tunas existe un banco de 3 transformadores monofásicos de 250MVA realizando el trabajo de uno trifásico, la conexión del banco es estrella-delta. El banco es alimentado por

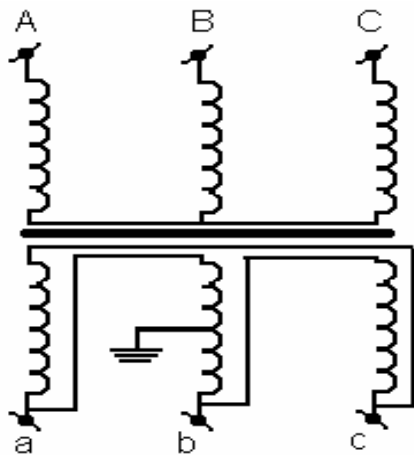


Fig 1.1 Esquema de conexionado de los transformadores de la empresa de productos lácteos de las tunas

neutro. Esta conexión nos permite tener diferentes niveles de tensión sin la necesidad de instalar otro transformador. La demanda máxima (pico máximo), históricamente ha sido de 324 Kw y la capacidad instalada en transformadores es de 750 MVA, por lo que el transformador está sobredimensionado.

el circuito primario de 33kV. En el secundario, el banco de transformadores tienen una particularidad, poseen una derivación central de 220 V cada devanado, la derivación central del transformador de la fase b está puesta a tierra por lo que en el secundario tenemos dos voltajes diferentes, 440 V en la conexión delta y 220 V las fases a y b al

Cuando tres transformadores están conectados en Delta, puede retirarse uno de ellos sin interrumpir el funcionamiento del circuito, en cierta manera, los dos transformadores restantes, trabajando en una delta abierta, llevan la carga del transformador que falta. El deseo de tener cierta garantía, al suprimir un transformador debido a una avería, ha hecho bastante extensivo el empleo de la conexión de transformadores en triángulo, especialmente en los suministro de baja tensión. Debe notarse que en el caso de que un transformador se averíe, los otros dos quedarán sometidos a un gran aumento de pérdidas.

1.2.3 Levantamiento de la carga.

Cada usuario de la energía eléctrica(independientemente de la magnitud de la carga que tenga instalada) hace uso de la misma de acuerdo a sus necesidades, y como estas no permanecen constantes a lo largo del día, es evidente que se produzcan variaciones en la demanda por lo que las instalaciones eléctricas deben estar adecuadamente diseñadas para hacer frente a las peores condiciones(altas demandas), de operación a la vez que deben ser racionalmente proyectadas y construidas en forma que los costos de instalación no resulten excesivos.

Un ahorro significativo de la energía, en forma de reducción de perdidas, puede lograrse si además de un diseño adecuado se logra una operación que tenga estos objetivos priorizados, considerados el efecto de la variación de las cargas. Estos aspectos serán utilizados a continuación.

La empresa de productos lácteos de las Tunas esta constituida mayormente por motores asincrónicos de una baja eficiencia, estos motores se encuentran en mal estado técnico, operando bajo condiciones desfavorables como lo son: la humedad en algunos casos y otros bajo la influencia de los rayos solares, lo que implica el deterioro y un alto consumo energético, por calentamiento y humedad en sus devanados, esto ha llevado consigo la destrucción de los mismos, por lo que la empresa se ha visto en la necesidad de enrollarlos, en su propio taller, quedando sus parámetros diferentes a los parámetros originales de chapa. La empresa cuenta con un total de 108 motores, distribuidos por 12 áreas, conectados a una barra principal, estos motores representan un 98.74% de la carga total instalada, mientras que en

equipamiento como computadoras, iluminación, aires acondicionados entre otros solo representa un 1.26% del total, la empresa cuenta con un sistema de distribución mayormente en Radial independiente, aunque tiene ramas en configuración Radial. La energía eléctrica llega a los consumidores por medio de 8 barras distribuidas en 13 áreas diferentes. En el [Anexo 1](#) se da la relación detallada de los consumidores de la empresa.

Para la realización de un estudio para mejorar el factor de potencia se debe tener en cuenta el monolineal de la empresa en cuestión, para lograr la más alta eficiencia de los elementos compensadores. La localización de estos elementos es un punto de gran importancia para lograr su mayor eficiencia.

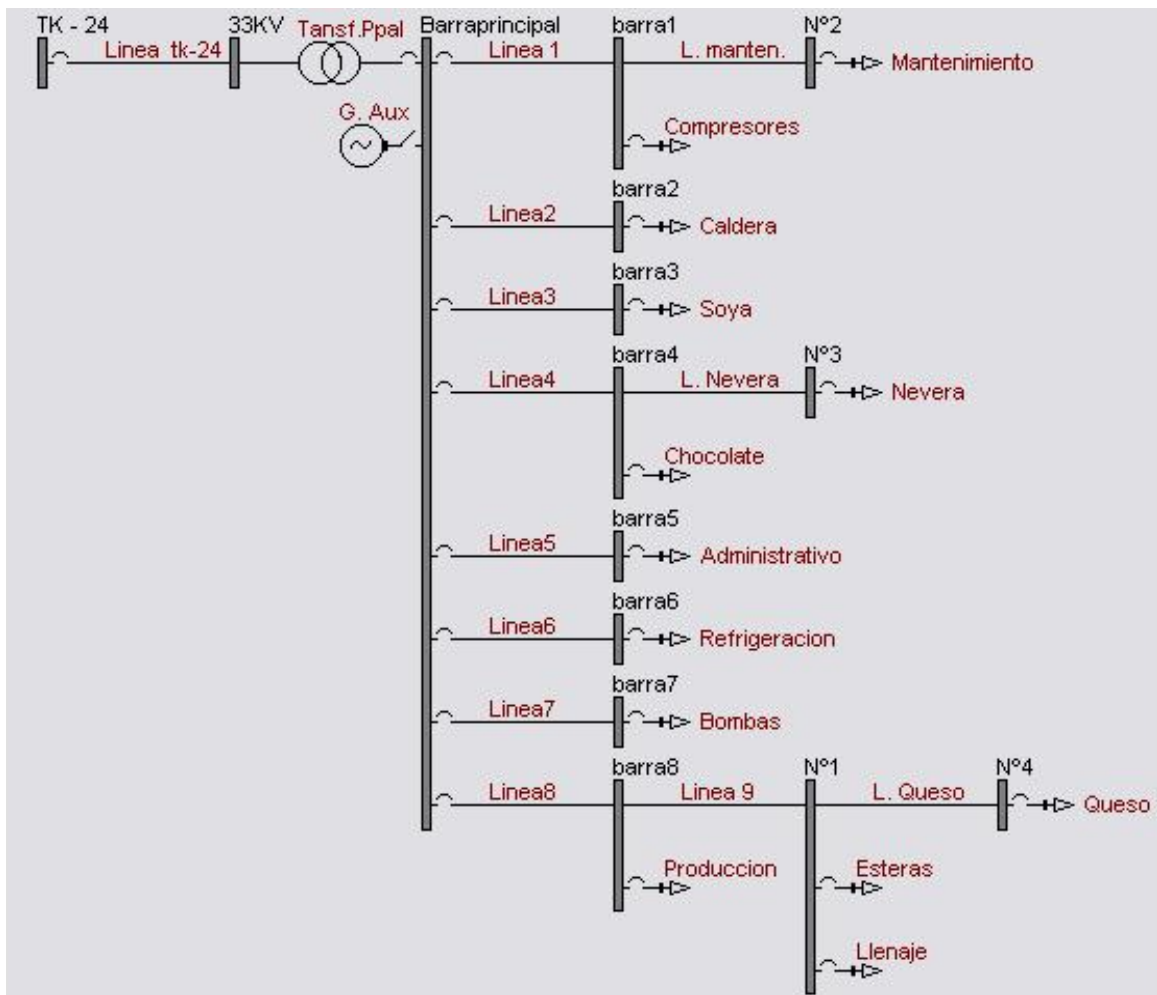


Fig: 1.4 Esquema monolineal de la empresa de productos lácteos de las tunas.

1.2.4 Variaciones del consumo de energía. Gráficos de carga.

Las formas más adecuada de analizar la variación del consumo de energía eléctrica, es por medio de una representación grafica donde en el eje de las ordenadas se sitúa el consumo de las potencias y en el eje de las abscisas el tiempo (normalmente las 24 horas del día). La unidad básica de potencia que se usa en estas curvas es el Watt (W), pero como esta resulta pequeña se suele emplear múltiplos de la misma. Las unidades más usadas son las siguientes:

1kilowatt (kW) =1000W.

1megawatt (MW) =1000kW.

A continuación se representa el consumo eléctrico de la empresa correspondiente a 24 horas de medición con el analizador AR-5L. Se representan mediante gráficos de carga la potencia activa, reactiva y aparente.

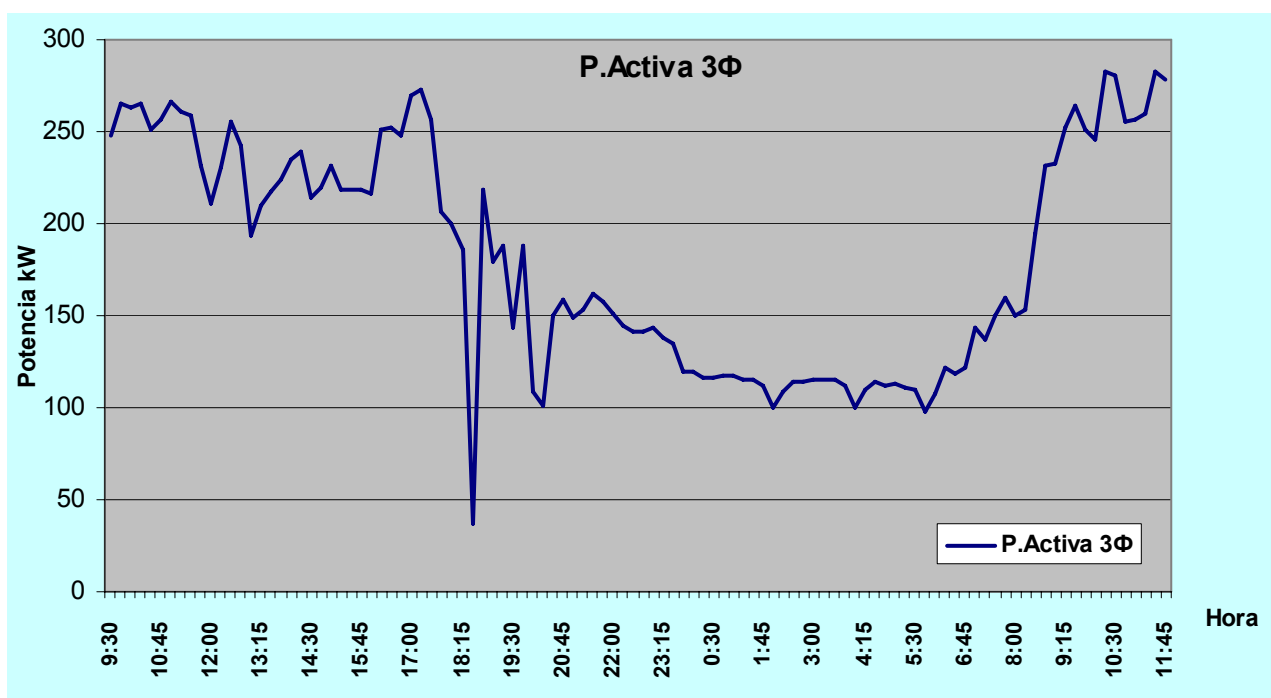


Fig: 1.5 Gráfico de potencia activa de la empresa de productos lácteos de las tunas.

En el [Anexo 2](#) aparecen los datos por los cuales se obtuvo este grafico.

El grafico de la figura representa la potencia activa en el tiempo durante 24 horas de medición, en el se observan dos picos de demanda máxima los cuales se sitúan en el horario de las 10:15 de la mañana con un valor de 283

kW y las 5:15 de la tarde con un valor de 273 kW, la mínima demanda ocurre a las 6:30 de la tarde con un valor de 37 kW. Como se muestra en el grafico, la empresa tiene un acomodo en la producción para reducir cargas en el horario pico, y no afectar al sistema electroenergético nacional en este horario, en el cual es donde ocurre el mayor consumo de la energía eléctrica por los consumidores. La potencia activa media consumida por la empresa tiene un valor de 182 kWh.

En el horario de la madrugada y de la mañana es cuando la empresa pone en funcionamiento los principales consumidores, para evitar utilizarlos en horario pico. Para lograr un menor consumo se han puesto en marcha un plan de medidas de ahorro, las cuales se mencionan a continuación:

- ✓ Parar en el horario pico un compresor de amoniaco.
- ✓ No pasteurizar leche en el horario pico.
- ✓ Los equipos de soldadura eléctrica, máquinas herramientas y equipos de climatización no utilizarlos durante el horario pico.
- ✓ No bombear agua en los horarios comprendidos de 11:00 AM a 13:00 PM Y de 18:00 PM a 22:00 PM.
- ✓ Contratar la demanda lo más próximo al consumo real de la empresa.
- ✓ Trasladar hacia la madrugada los procesos que demandan mayor cantidad de energía.

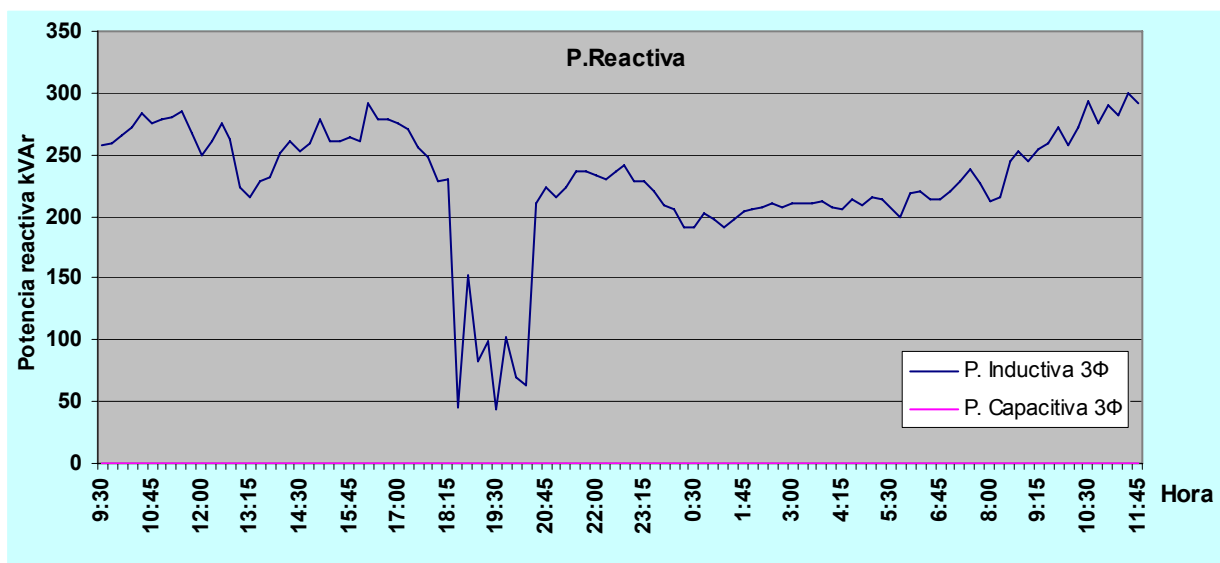


Fig: 1.6 Gráfico de potencia reactiva de la empresa de productos lácteos de las tunas.

En el [Anexo 2](#) aparecen los datos por los cuales se obtuvo este grafico.

En el grafico de la figura se representa la potencia reactiva correspondiente a un tiempo de 24 horas de medición. En el se observan dos picos de demanda máxima de reactivos los cuales se sitúan en el horario de las 11:00 de la mañana con un valor de 300 kVA y las 4:15 de la tarde con un valor de 292 kVA, la mínima demanda ocurre a las 7:30 de la tarde con un valor de 44 kVA. Como se puede ver existe una gran inestabilidad en el consumo de reactivos, estos varían de 44 kVA a 300 kVA en 24 horas. La potencia capacitiva tiene un valor de cero o nula en todo momento lo que indica que no existe un banco de capacitores para la compensación de reactivos.

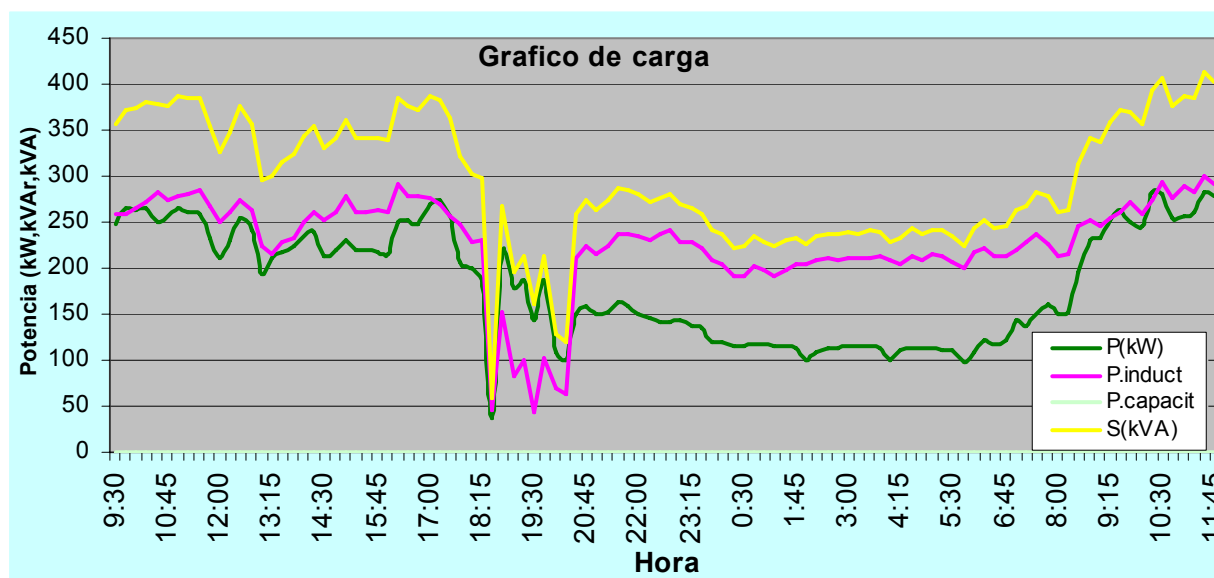


Fig: 1.7 Gráfico de potencias de la empresa de productos lácteos de las tunas

En el [Anexo 2](#) aparecen los datos por los cuales se obtuvo este grafico.

En el grafico se muestran la potencia activa, reactiva y aparente de la empresa. Como se puede apreciar la potencia inductiva (reactivos) esta por encima de la potencia activa, esto es la causa del bajo factor de potencia de la instalación. Como es de conocimiento el consumo excesivo de reactivos por una empresa, provoca la penalización de esta, con un aumento en su factura eléctrica y todo lo demás que este pueda ocasionar. Además de afectar el cableado, el transformador tiene que suministrar más potencia que la necesaria. En el grafico se observa que la potencia reactiva esta muy

cercana a la potencia aparente total de la empresa, provocando grandes cantidades de perdidas por la demanda excesiva de corriente reactiva.

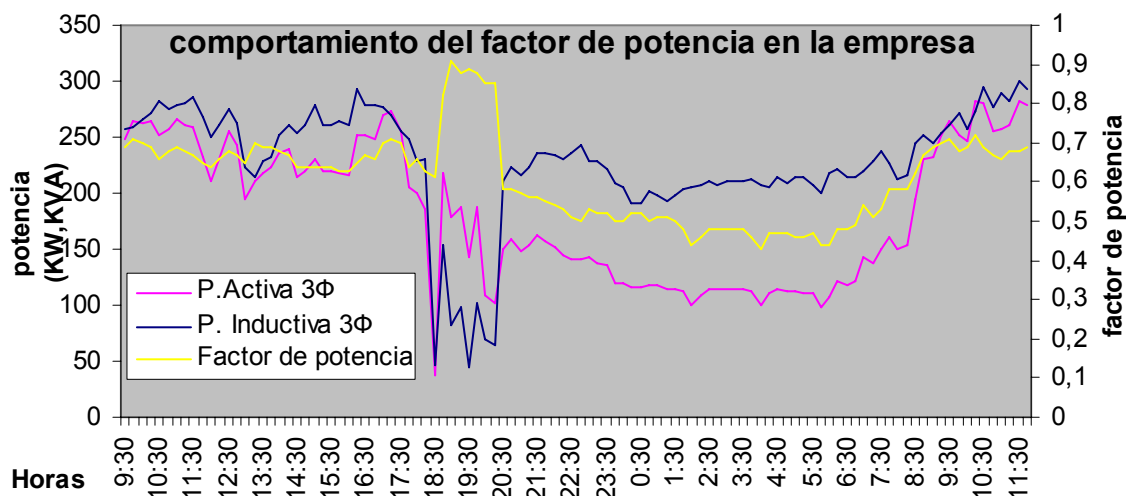


Fig: 1.8 Gráfico del comportamiento del factor de potencia en dependencia de la P (KW) y Q (KVA) de la empresa de productos lácteos de las tunas.

En el [Anexo 2](#) aparecen los datos por los cuales se obtuvo este grafico.

Como se puede apreciar en el grafico de la figura el factor de potencia de la empresa de productos lácteos de las tunas es muy bajo, solo alcanza un valor aceptable a las 19:00 horas con un valor de 0.91, pero en el tiempo restante oscila entre 0.43 y 0.88, con un valor promedio de 0.6, este problema esta condicionado porque la potencia inductiva esta casi siempre por encima de la potencia activa.

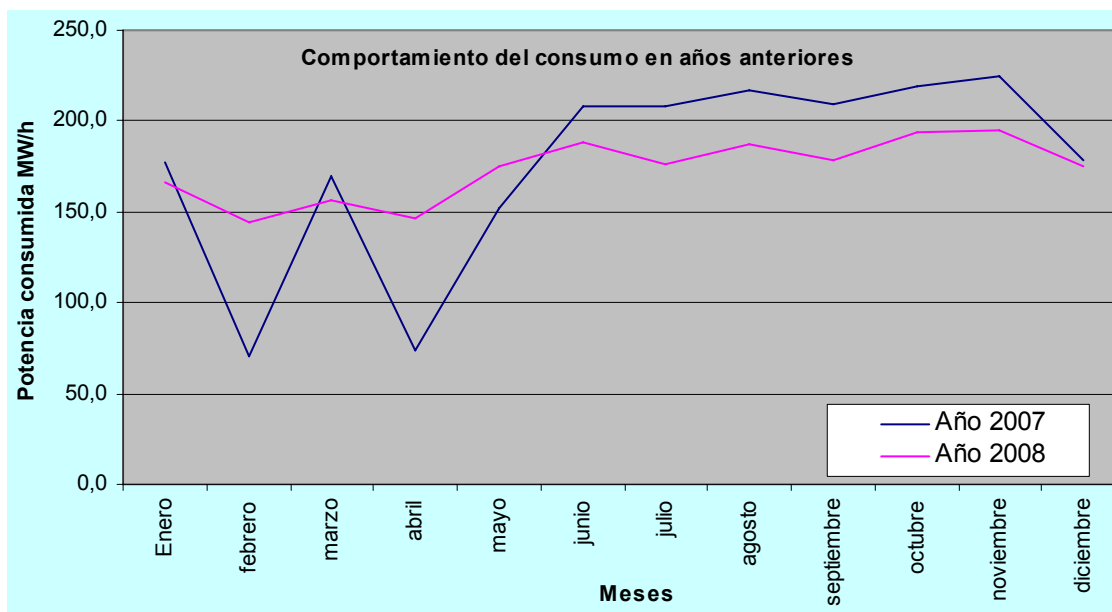


Fig: 1.9 Gráfico del comportamiento del consumo de energía de la empresa de productos lácteos de las tunas en años anteriores.

En el [anexo 3](#) aparecen los datos por los cuales se obtuvo este grafico

En el grafico se muestra el comportamiento del consumo de la electricidad correspondiente a los años 2007 al 2008, como se puede apreciar en el 2007 ese consumo fue bastante inestable, en el se observan varios picos de consumo mínimo en los meses de febrero con un valor de 70 MWh y abril con un valor de 73.6 MWh, y un pico máximo en el mes de noviembre de 225 MWh , en el año 2008 el comportamiento de la energía consumida fue mas estable, variando solo de 144 MWh a 195 MWh, siendo estos valores los picos mínimos y máximos respectivamente correspondientes a los mese de febrero y noviembre del 2008.El valor promedio de consumo de energía para estos 2 años es de 174.5 MWh.

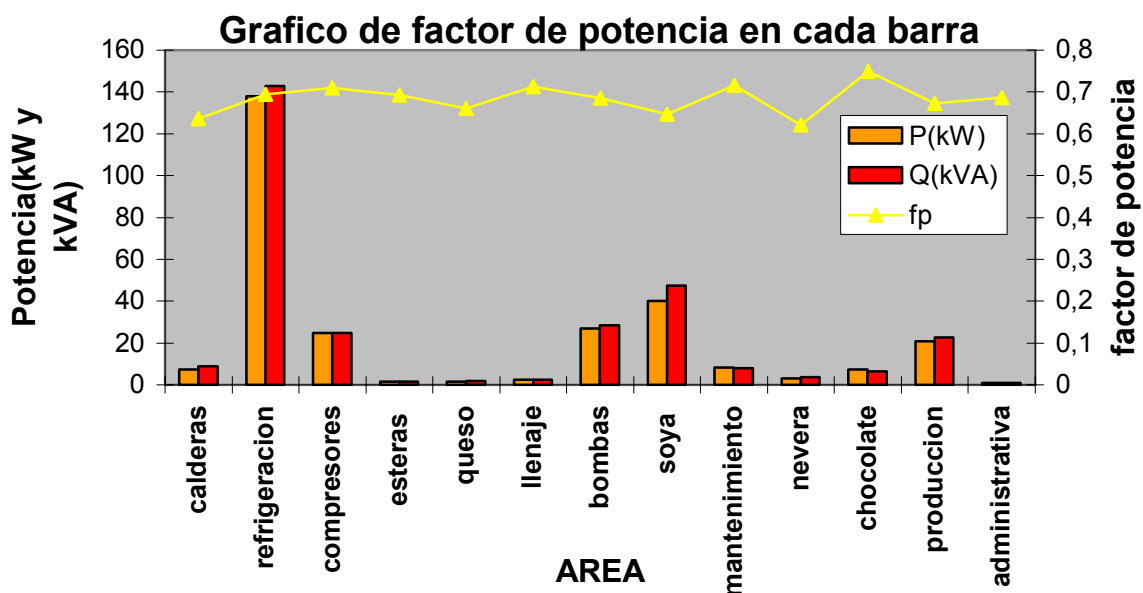


Fig: 1.10 Gráfico de potencias y factor de potencia en cada barra de la empresa de productos lácteos de las tunas.

En el [Anexo 4](#) Aparecen los datos por los cuales se obtuvo el grafico.

En el grafico de la figura se observa el comportamiento de las potencias y del factor de potencia en cada barra de alimentación de la empresa. Como se puede notar existe un bajo factor de potencia en todas las barras de distribución de la energía, teniendo su valor más alto en el área de chocolate

con un valor de 0.75 y llegando a tener valores en el área de la Nevera de 0.62, la media en la empresa es de 0.68, lo cual indica el estado de la eficiencia energética de la empresa.

1.3 Métodos para la determinación del factor de potencia en una instalación.

Cuando se trata de cargas individuales, generalmente el factor de potencia es conocido o puede ser estimado a partir de los datos del fabricante. Si esto no es factible o si se tiene un conjunto de cargas diferentes, tanto por su naturaleza como por sus tiempos de conexión, es conveniente auxiliarse de equipos de medición. El factor de potencia se puede evaluar en forma instantánea o como promedio para un intervalo. El conocimiento periódico de valores instantáneos, sobre todo en condiciones de demanda máxima, permite determinar su comportamiento y ofrece una perspectiva para controlarlo. En instalaciones donde la carga no esté sujeta a grandes variaciones durante las horas de trabajo, puede ser considerado un factor de potencia promedio. Existen varios métodos para determinar el factor de potencia. Los que se han utilizado usualmente son:

- *Con instrumentos para medir valores instantáneos.*

Las lecturas de potencia activa, tensión y corriente con instrumentos convencionales (watímetros, voltímetros y amperímetros), permiten obtener el factor de potencia instantáneo al sustituirse en las expresiones adecuadas, según la instalación sea monofásica o trifásica. Se puede utilizar un metro indicador de factor de potencia (fasímetro), que proporciona en forma directa el valor de $\cos\phi$. Adicionalmente, la medición de la potencia activa servirá para calcular la potencia reactiva capacitiva, necesaria para corregirlo. Sin embargo, con cargas variables, estas lecturas pueden tener poco valor o conducir a estimaciones inadecuadas, salvo que se tomen lecturas sistemáticas en intervalos de tiempo predeterminados, que usualmente deben ser reducidos. Los factores subjetivos que conducen a registrar valores fuera de la realidad, es un aspecto que siempre debe considerarse.

- *Con medidores de energía activa y reactiva.*

Este es el factor de potencia medio pesado o simplemente factor de potencia medio al que se hizo referencia en el inciso 1.1, o sea, aquel calculado durante un período a partir de las lecturas de los medidores de energía activa (kWh) y reactiva (kVARh) mediante la ecuación:

$$\cos \varphi = \frac{kWh}{\sqrt{(kWh)^2 + (kVARh)^2}} = \frac{kW}{\sqrt{(kW)^2 + (kVAR)^2}}$$

La potencia activa promedio (kW), se determina dividiendo los kWh medidos entre el número de horas que abarca el período considerado. Igualmente, la potencia reactiva promedio se calcula a partir los kVARh entre el número de horas. Precisamente el factor de potencia promedio durante un ciclo de facturación (un mes), es el para la bonificación o recargo que por este concepto se hace en la factura de electricidad.

- *Con sistemas avanzados de medición.*

Actualmente se encuentran en el mercado una gran variedad de sistemas de medición (conocidos como analizadores de redes) que permiten obtener todas las variables que posibilitan realizar una completa valoración de cada uno de los indicadores energéticos, incluyendo el factor de potencia. Estas mediciones se pueden realizar por telemedición, en los puntos del circuito que resulte conveniente; se pueden programar los intervalos de tiempo en que se efectúan; el sistema puede ser conectado en interfase con computadoras para el procesamiento de datos y otras facilidades. Aunque los costos de estos equipos puedan parecer elevados, sus ventajas como herramientas para el control del consumo de energía y para tomar las medidas de ahorro pertinentes, permiten usualmente recuperar la inversión en un tiempo satisfactorio. Para la realización de este estudio se usó un sistema avanzado de medición, el instrumento utilizado fue un analizador de redes.

1.3.1 Características del Analizador de redes utilizado.

Los analizadores de redes se han incorporado al mercado con gran aceptación por su sencillez, maniobrabilidad, precisión, efectividad y el número de opciones que brinda. Este tipo de instrumento incorpora al menos cinco funciones principales.

- Registrador de datos.
- Analizador de demanda.
- Analizador de armónicos.
- Analizador de perturbaciones.
- Visualizador de formas de onda.

Sus funciones son potenciadas por opciones de auto chequeo, ajuste de relaciones, modos de medición, análisis de ciclos, etc. Cuando se conecta el analizador a una PC con el software apropiado, se realizan funciones auxiliares como variar el zoom, análisis de composición armónica, etc.

Este tipo de instrumento es útil en una extensa variedad de casos aunque posee una sensibilidad limitada para analizar determinadas perturbaciones, fundamentalmente, transitorios impulsivos y oscilatorios y variaciones de corta duración.

En este caso el estudio se realizó con un analizador de redes trifásico de la firma CIRCUTOR y de la serie AR5-I, NS: 408504031 INV: 7678.



En la figura se muestra el analizador utilizado para la realización de las medidas de las variables eléctricas en la empresa de productos lácteos de las tunas, obteniendo una gran precisión en las medidas tomadas por dicho instrumento.

Una de las características que distinguen a este analizador de redes, es que este se conecta con el Kit 3 C-FLEX, el cual corresponde a una gama portátil de sistemas de medidas para corrientes alternas. Gracias a la flexibilidad de sus sensores de corriente, podemos encerrar uno o varios conductores, independientemente de su forma (barras, tubos, portacables, etc.) y de su accesibilidad.

Características de los sensores de corriente C-FLEX.

- Alta precisión.
- Conexión directa al analizador, sin la necesidad de transformadores de corriente.
- Amplia gama de medidas (5A- 20kA).
- Efecto de saturación inexistente.
- Defasaje mínimo, ideal para medidas de potencia.
- No sensibles a corriente continúa.
- Sistema de cierre precintable.
- Muy ligero (no presenta circuito magnético).
- Alimentación tanto externa como por baterías.
- Salida adaptada a los niveles de medida.
- Medida simultanea de las tres fases.



Fig. 1.3: Kit 3 C- FLEX

Para la realización de este trabajo se tomo como puntos de referencia para realizar las mediciones con el analizador, la barra principal de la empresa por tener un circuito radial independiente.

1.4 Conclusiones del capítulo

En la empresa de productos lácteos de las tunas no se hace un uso racional de la energía eléctrica, debido a la ausencia de elementos compensadores.

El transformador de alimentación de la empresa está sobredimensionado, lo que ocasiona pérdidas al encontrarse operando a un 54.9 % de cargabilidad cuando está operando en el horario de demanda máxima.

La empresa tiene contratado 455 kW y ella consume realmente 324 kW en su pico histórico máximo, lo que representa un 71.2% de sobrefacturación de la energía.

El factor de potencia en los alimentadores oscila entre 0.43 y 0.68 por lo que se hace necesario la compensación de la potencia reactiva. Esto está condicionado por la presencia de motores asíncronos sobredimensionados, los cuales representan un 98.74% de la carga total instalada.

CAPITULO 2: Compensación de la potencia reactiva

2.1 Factor de potencia.

2.2 Inconvenientes de un bajo factor de potencia.

2.3 Métodos de corrección del factor de potencia.

2.4 Ventajas de corregir el factor de potencia.

2.5 Métodos de cálculo de la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia.

2.6 Consideraciones para la localización de los capacitores.

2.7 Significado de la compensación en redes de alimentación.

2.8 Control de los bancos de capacitores.

2.9 Tipos de compensación.

2.10 Selección del método a implementar para la corrección del factor de potencia.

INTRODUCCIÓN

Para la localización óptima de bancos de condensadores en redes de distribución se debe tener en cuenta tanto aspectos técnicos como económicos. Ambas perspectivas, vistas separadas o en conjunto, constituyen universos llenos de posibilidades. Una gran cantidad de métodos han sido desarrollados para resolver el problema de localización de condensadores. En la actualidad se han desarrollado técnicas que se adaptan mejor a los requerimientos del problema, como son las basadas en técnicas computacionales. A medida que el sistema eléctrico de una empresa crece, la compensación reactiva se hace cada vez más necesaria para lograr los niveles adecuados de tensión y capacidad instalada. La forma clásica de solucionar este problema es por tanteos mediante repetidos flujos de carga, ayudándose de la experiencia de los ingenieros de planeamiento hasta encontrar una solución satisfactoria, ésta no permite garantizar que dicha solución sea la óptima. Desde 1968, se empezó a estudiar una forma sistemática de solucionar el problema, surgiendo diferentes metodologías, diferenciándose mayormente en los métodos matemáticos utilizados, entre ellas se encuentran la

programación lineal, programación no lineal y recientemente los algoritmos genéticos. El presente trabajo está dirigido al estudio de la asignación óptima de compensación reactiva en sistemas eléctricos de potencia mediante un programa computacional basado en algoritmos genéticos, con características similares a las de otros programas para PC disponibles a nivel mundial. Cabe mencionar que por tener acceso al código fuente es posible mejorarlo y adaptarlo a nuevos requerimientos asociados a los sistemas eléctricos de potencia.

2.1 Factor de potencia.

Es un indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica.

El Factor de Potencia puede tomar valores entre 0 y 1, lo que significa que:



Aunque el factor de potencia ideal es el que mas cercano este a uno, no es aconsejable compensar a mas de 0.95, por problemas de sobrecompensación en un momento dado. Cabe destacar que un factor de potencia de 0.9 esta entre los limites permisibles por la empresa eléctrica para no ser penalizado, aunque con este valor tampoco será bonificada el cliente, un buen factor de potencia es el que oscila entre 0.92 y 0.95, pues no existirá sobrecompensación de reactivos en la red y la empresa será bonificada por la empresa eléctrica.

Eléctricamente hablando, el factor de potencia es la relación entre la potencia activa (que produce trabajo en la carga) y la potencia aparente del circuito:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} * U * I} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos(\tan^{-1}(Q/P))$$

Esta es la expresión del factor de potencia instantáneo en un momento dado. Sin embargo, considerando la variabilidad de la carga eléctrica en el tiempo, se acostumbra a emplear el término de factor de potencia medio pesado para referirse a un valor constante que representa la relación entre la energía activa E_a (kWh) y la energía aparente E_s (kVAh) suministrada a la carga:

$$Fp_{MP} = \frac{Ea}{\sqrt{Ea^2 + Er^2}} = \cos(\tan^{-1}(Er / Ea))$$

donde:

$$\sqrt{Ea^2 + Er^2} = Es$$

El factor de potencia medio pesado es el que corrientemente se emplea por las empresas distribuidoras de energía eléctrica para facturar la energía que se suministra a una empresa industrial dada.

Por otra parte, se habla de factor de potencia natural de una instalación, cuando se refiere al factor de potencia instantáneo o medio pesado de dicho circuito sin considerar el efecto de los motores sincrónicos, capacitores u otros equipos compensadores del factor de potencia instalados, mientras que cuando se consideran dichos equipos se habla de factor de potencia global o simplemente factor de potencia de la instalación.

2.2 Inconvenientes de un bajo factor de potencia.

Una instalación industrial común tiene un factor de potencia natural que puede ser relativamente bajo, en el rango de 0.6 a 0.8 inductivo. Este bajo factor de potencia se debe a la presencia de motores asincrónicos subcargados, el uso de convertidores electrónicos para el suministro de corriente directa, la utilización de dispositivos de inducción, de unidades de climatización, y el empleo de lámparas fluorescentes. En la medida en que la planta está más motorizada, puede esperarse un empeoramiento del factor de potencia, a menos que se tomen medidas correctivas.

La potencia aparente y, como consecuencia, la corriente de la carga dependen inversamente del factor de potencia de la misma:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (\text{VA})$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi}$$

De estas expresiones puede concluirse que un bajo factor de potencia incrementa la corriente. Gráficamente esto se puede observar en la Figura 2.1, donde se

evidencia que cuanto mayor sea la corriente reactiva inductiva I_L para una misma potencia activa (I_R constante), mayor es el ángulo φ y por tanto, más bajo el factor de potencia $\cos\varphi$. Como consecuencia, se produce un incremento en la corriente total I . El incremento de la corriente produce serios inconvenientes (no sólo para el usuario sino también para la empresa que suministra energía eléctrica), como los que se describen a continuación.

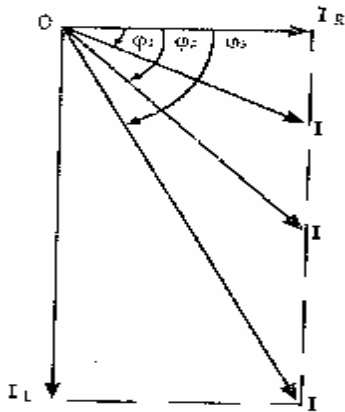


Figura2.1: Disminución del factor de potencia al incrementarse la corriente reactiva I_L .

- *Disminución de la capacidad de los equipos de generación, distribución y maniobra de la energía eléctrica.*

Muchos equipos eléctricos, como son los generadores, transformadores, conductores, seccionadores, fusibles, interruptores automáticos, etc. se dimensionan a partir de una capacidad de corriente. El incremento de la corriente debido a un bajo factor de potencia aumenta la carga térmica de los equipos que suministran o permiten el paso de dicha corriente, produciendo fallas, reducción de la vida útil, operaciones inadecuadas, etc. Esto puede obligar, por ejemplo, a utilizar conductores de mayor calibre, transformadores de mayor capacidad que serán, por lo tanto, más caros.

- *Incremento en las pérdidas de potencia y energía.*

Las pérdidas de potencia y energía en transformadores, cables y otros elementos del sistema dependen de la circulación por dichos elementos, tanto de la potencia activa como reactiva de las cargas.

Así, como ya se había planteado anteriormente, las pérdidas de energía P (W) son:

$$\Delta P = 3I^2 * R = 3 \left(\frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi} \right) * R = \frac{P^2}{U^2 * \cos^2 \varphi} * R$$

$$\Delta P = 3 \left(\frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} * U} \right) * R = \frac{P^2 + Q^2}{R^2} * R$$

Un bajo factor de potencia provoca un incremento apreciable de las pérdidas de potencia en los elementos serie y por ende, en las pérdidas de energía.

- *Deficiente regulación de tensión.*

La caída de tensión en un elemento serie determinado (cable, transformador, etc.), se define como la diferencia entre los valores modulares de fase a neutro de la tensión en el lado de la fuente V_s y en el lado de la carga V_r :

$$\Delta U = U_s - U_r$$

En forma general, la caída de tensión de una fase a neutro en una línea que tiene una resistencia R y reactancia X , depende de la corriente I circulante y su factor de potencia. Se demuestra que la caída de tensión depende en forma exacta de la expresión:

$$\Delta U = U_s + I * R * \cos \varphi + IX \sin \varphi - \sqrt{U_s^2 - (I * X \cos \varphi - I * R \sin \varphi)^2}$$

Debido a que la reactancia inductiva es generalmente mayor que la resistencia, las caídas de tensión en los elementos del sistema dependen primordialmente de la magnitud de la potencia reactiva circulante. De esta forma, si las cargas tienen bajo factor de potencia, pueden esperarse caídas de tensión más pronunciadas en transformadores y cables.

- *Incremento en la factura de energía eléctrica.*

Por lo anteriormente visto, un bajo factor de potencia significa energía desperdiciada y afecta a la adecuada utilización del sistema eléctrico. Por esta razón, en las tarifas eléctricas se imponen cuotas a manera de multas si el factor

de potencia es menor que cierta cifra (penalización) y se ofrece una reducción en la factura (bonificación) en instalaciones con un factor de potencia elevado.

2.3 Métodos de corrección del factor de potencia.

El mejoramiento del factor de potencia en la industria o los servicios, sólo puede ser alcanzado a través de la correcta combinación de diferentes medios para su elevación, cada uno de los cuales debe ser técnica y económicamente fundamentado. Los medios para la elevación del factor de potencia pueden ser considerados dentro de los grupos generales siguientes:

a) Sin la aplicación de medios compensadores.

b) Con la aplicación de medios compensadores.

➤ Sin la aplicación de medios compensadores.

El primer paso para corregir el bajo factor de potencia en una instalación es prevenirlo, para lo cual se debe evitar, en lo posible, la demanda excesiva de potencia reactiva. Para esto, en términos generales, no se requieren grandes inversiones capitales. A esta variante pertenecen las siguientes medidas:

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

Ordenamiento del proceso tecnológico.

La sola aplicación de medidas organizativas del proceso de producción puede significar un efecto considerable en la elevación del factor de potencia, siempre

que ellas sean encaminadas al mejoramiento del régimen de trabajo eléctrico de la instalación. La coincidencia innecesaria en el proceso productivo de actividades que implican algún grado de subutilización de los equipos eléctricos (que por lo general son evitables), conducen a un mayor consumo de energía eléctrica y, casi siempre, a un empeoramiento del factor de potencia.

Sustitución de los motores subcargados por otros de menor potencia.

Los motores que operan con bajas cargas disminuyen su factor de potencia. En la Figura 2.4 se tiene una curva característica para un motor, nótese cómo el factor de potencia decrece sensiblemente para cargas por debajo del 50 % de su potencia nominal. Por esto, es importante adecuar la capacidad de los motores a sus cargas reales y evitar su operación prolongada en vacío. Desde luego, siempre se requerirá de un adecuado análisis técnico económico de cualquier medida de sustitución de motores en operación, que deberá incluir la valoración de los costos de mejorar el factor de potencia con el uso de medios compensadores, sin sustituir el motor.

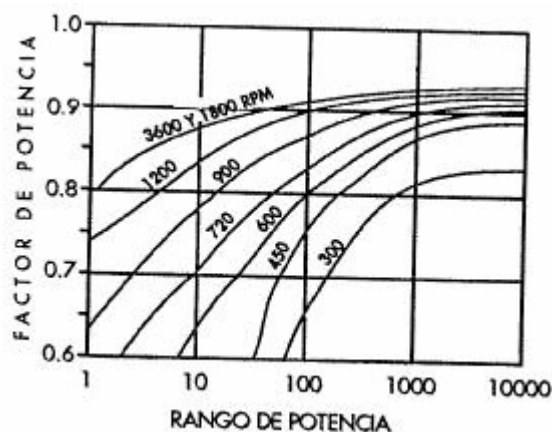


Figura 2.3. Curvas típicas de motores trifásicos, donde se observa la variación del factor de potencia con respecto a la velocidad sincrónica y la potencia del motor.

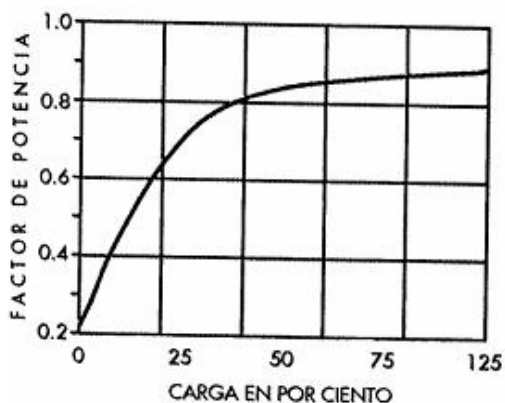


Figura 2.4. Variación del factor de potencia con la carga de un motor asíncrono.

Limitación del trabajo de los motores en vacío.

El trabajo de muchos motores asíncronos se caracteriza porque en los intervalos entre cargas ellos operan en vacío. En no pocas aplicaciones, el tiempo de trabajo de los motores en vacío llega a ser del 50 - 60 % del tiempo total del ciclo. Si los intervalos de trabajo en vacío son suficientemente grandes, resulta conveniente desconectar el motor de la red durante este tiempo. Esto disminuirá el consumo de potencia activa y, particularmente, de potencia reactiva.

Sustitución de motores asíncronos por motores síncronos.

Puede ser ésta una interesante medida para la elevación del factor de potencia y, por ende, para la reducción de las pérdidas; pero debe tenerse en cuenta que ello sólo es posible en aquellos casos en que las condiciones del proceso tecnológico así lo permitan y de que se cumplan determinados requisitos. Se llegan a justificar cuando se requieren motores nuevos y de tamaño considerable con respecto a la instalación, bajas velocidades de carácter constante y cargas poco variables. Siempre se requiere de un análisis económico para evaluar la decisión a tomar.

➤ **Con la aplicación de medios compensadores.**

Usualmente no resultan suficientes las medidas que permiten la corrección del factor de potencia sin emplear medios compensadores y entonces, resulta imprescindible la utilización de elementos auxiliares. Estos equipos de naturaleza capacitiva, toman una corriente en adelanto con respecto a la tensión, que se opone a la corriente inductiva de las cargas de la instalación. La manera de mostrar el efecto descrito es a través de las relaciones de

potencia. En la Figura 2.5 se observa cómo la potencia reactiva capacitiva $kVAR_C$, reduce el requerimiento de potencia reactiva total ($kVAR_L - kVAR_C$), disminuyendo tanto el ángulo ϕ como la potencia aparente kVA . Por ningún motivo se debe sobrecompensar la carga, ya que un exceso de $kVAR_C$ puede ser tan perjudicial como su defecto. En la práctica, principalmente por razones económicas, los $kVAR_L$ no se anulan totalmente, sino se les mantiene dentro de los valores que den los costos totales menores. La evaluación económica en cuanto a qué magnitud de los $kVAR_L$ debe compensarse, debe ser realizada empleando métodos de descuento.

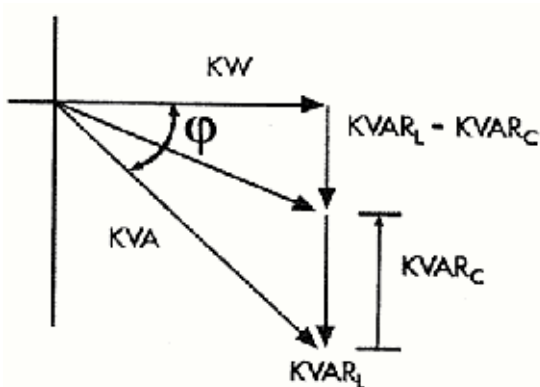


Figura 2.5. Efecto de los $kVAR_C$ sobre los $kVAR_L$ en una instalación.

Equipos compensadores de potencia reactiva.

Los equipos empleados en la compensación de la potencia reactiva de las cargas son fundamentalmente:

- Bancos de capacitores estáticos.
- Condensadores sincrónicos (motores sincrónicos sobreexcitados).
- Compensadores activos (basados en electrónica de potencia: SVC, FACTS).

De ellos, por su bajo costo, reducido mantenimiento y bajas pérdidas de energía, los bancos de capacitores son los compensadores más empleados en la industria.

2.4 Ventajas de corregir el factor de potencia.

De manera invertida, lo que no produce un efecto adverso produce una ventaja; por lo tanto, el corregir el factor de potencia a niveles más altos, nos da como consecuencia:

- Reducción de la factura eléctrica.
- Liberación de capacidad en el sistema.
- Reducción de las pérdidas de potencia y energía en el sistema.
- Mejoramiento de las condiciones de tensión en el sistema.
- Reducción de pérdidas de transmisión.
- Mejorar la utilización de la capacidad de transmisión.
- Postergar inversiones por necesidades de refuerzos.
- Aumento de los márgenes de reserva de potencia reactiva frente a eventuales perturbaciones.
- Minimizar costos de operación del sistema; evitar restricciones al despacho económico; prevenir colapsos de tensión y mantener márgenes de seguridad.
- Mejora del margen de estabilidad estacionaria y transitoria del sistema.
- Pequeñas pérdidas de potencia activa (0.0025 a 0.005 kW/kVAR).
- Simplicidad de la explotación (por ausencia de las partes rotatorias).
- Simplicidad del montaje (pequeño peso, no requieren bases o cimientos, etc.).
- Para su instalación puede ser utilizado cualquier lugar seco.
- Bajo costo.
- Mantenimiento casi nulo.
- Igual o más alta confiabilidad que los motores sincrónicos, aunque son más sensibles a las fallas de cortocircuito y a tensiones superiores al nominal.
- Bajo tiempo de respuesta de control.
- Pueden ser diseñados con control individual de tensión de fase.

Es por ello que con una buena selección de capacitores y una ubicación óptima de estos, se obtienen beneficios tanto económicos como técnicos.

➤ Reducción de la factura eléctrica.

El uso principal de los capacitores en la industria y a menudo el factor determinante para emplear motores sincrónicos en una instalación, es la presencia en la tarifa eléctrica de una penalización por bajo factor de potencia.

Es común para inversiones de capacitores, que estas se paguen en plazos muy pequeños 0,5 - 3 años para aquellos de 460 – 575 V; ó 2 – 6 años para

capacitores de 230 V, solo por concepto del ahorro obtenido con la eliminación de la penalización por bajo factor de potencia.

El efecto en la factura de un incremento del factor de potencia puede ser considerable si el factor de potencia inicial es inferior al 90%. Por lo general, para tomar plena ventaja de la bonificación, se acostumbra compensar hasta un factor de potencia cercano al 96% (que es el máximo posible a bonificar), aunque siempre una decisión final debe estar acompañada de un adecuado análisis económico.

➤ Liberación de la capacidad del sistema.

Cuando los capacitores o motores sincrónicos están operando, ellos suministran los requerimientos de potencia reactiva de la carga y reducen la corriente circulante desde la fuente hasta el punto de ubicación de los compensadores. Menos corriente significa menor carga en kVA para generadores, transformadores, cables, etc.

Por lo tanto, los medios compensadores pueden utilizarse para reducir la sobrecarga de los circuitos; o, si estos no están sobrecargados, permitir el incremento de su capacidad de carga. Se define como capacidad térmica liberada por el incremento del factor de potencia, o simplemente, capacidad liberada, a la carga en kVA que puede ser añadida a la carga original a su mismo factor de potencia sin que se incremente la carga total en kVA del circuito. Esto demuestra que en muchos casos es más barato liberar capacidad compensando el reactivo, que incrementando la capacidad de la subestación y otras facilidades.

➤ Reducción de pérdidas.

En la mayoría de las instalaciones, las pérdidas de energía en el sistema de distribución representan entre el 2.5 – 7.5% de la energía consumida por las cargas. Esto depende de la variabilidad de las cargas, el calibre y longitud de los circuitos, etc. Los medios compensadores solo pueden reducir la parte de las pérdidas debida a la circulación de la potencia reactiva. Las pérdidas en un circuito son proporcionales al cuadrado de la corriente, por lo que un cambio en el factor de potencia $\cos \phi_1$ a $\cos \phi_2$ provoca una variación de las pérdidas.

En el caso general en que se conectan un conjunto de bancos de capacitores en diferentes nodos del sistema eléctrico, el ahorro en las pérdidas depende del

efecto de todos los bancos y no puede separarse por cada uno de ellos.

Todo esto hace de los capacitores la forma más práctica y económica para mejorar el factor de potencia. Una característica de estos compensadores estáticos que puede resultar desventajosa, es que su capacidad generadora de reactivo es proporcional a la tensión al cuadrado, por lo que se ve reducida para bajas tensiones. Por otra parte, algunos sistemas estáticos empleados para su control generan armónicos.

2.5 Métodos de cálculo de la potencia reactiva necesaria para corregir el factor de potencia.

Para calcular el valor del capacitor a instalar en la industria para la corrección del factor de potencia, se utilizan varios métodos entre los cuales se encuentran:

- *A partir de la factura eléctrica.*

La empresa suministradora proporciona los datos de energía activa y energía reactiva durante un período de tiempo determinado (normalmente 2 meses), a partir de estos datos, obtenemos la potencia de condensadores.

Por ejemplo: Para un período de 2 meses los consumos han sido los siguientes:

* Energía reactiva: 63.590 KVAR/h

* Energía activa: 54.350 KWh

Suponiendo una jornada de trabajo de 8 horas y 25 días al mes y tomando como valor del $\cos\phi^2 = 0,9$. Con un contador de potencia activa, un voltímetro y un amperímetro. Considerando una red trifásica equilibrada, con ayuda de un fasímetro obtenemos directamente el $\cos\phi^1$; además medimos V e I.

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos\phi^1$$

Cuando la carga total de una planta que se va a compensar no presenta variaciones importantes durante la jornada de trabajo, el cálculo de la potencia reactiva de los capacitores a instalar (kVARC) puede realizarse a partir de la factura eléctrica. Para esto se escoge el mes donde el reporte de energía reactiva sea más elevado y se toman los valores de kWh y kVARh facturados. Se determina el factor de potencia promedio existente en la instalación, al que

se le denominará $\cos\phi_1$. La potencia reactiva necesaria de los capacitores, para corregirlo a un nuevo valor de $\cos\phi_2$, se puede calcular aplicando directamente la siguiente expresión derivada de las relaciones del triángulo representativo de la potencia aparente, activa y reactiva:

$$kVAR_C = kW(\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$
$$\tan \phi_1 = \tan(\cos \phi_1^{-1})$$

Con el objetivo de simplificar los cálculos, los fabricantes de capacitores han preparado materiales auxiliares, como el que se tiene en la [Anexo 5](#), en la que se puede encontrar rápidamente el valor del multiplicador. El factor de potencia ($\tan\phi_1 - \tan\phi_2$) que se desea corregir está mostrado como ordenada y el factor de potencia deseado, como abscisa. La magnitud del multiplicador es leída en la intersección. Por ejemplo, considérese una carga de 1000 kW con un factor de potencia de 0.8, que se desea modificar a 0.9. De la Tabla 2.1 el multiplicador es 0.266; por lo tanto, la potencia de los capacitores es: $1000 \times 0.266 = 266 \text{ kVAR}$.

Sin embargo, con sencillas herramientas de programación estos valores pueden obtenerse de forma más precisa, amigable y rápida. Igualmente pueden hacerse cálculos semejantes en ramales, cargas de gran capacidad, etc., que presenten las características mencionadas, si se conectan medidores de potencia activa y reactiva.

- *Con mediciones en condiciones de demanda máxima.*

Si la carga presenta cambios significativos, puede emplearse tanto el factor de potencia, como la potencia en condiciones de demanda máxima. Se debe tener cuidado que los capacitores así seleccionados, cuando se esté en condiciones de mínima carga, no causen una sobrecompensación, ya que ésta se traduciría en una elevación de la tensión, lo cual podría alcanzar niveles peligrosos. Si esto ocurriera, debe considerarse la utilización de bancos desconectables o de regulación automática, con los que se puede mantener un factor de potencia dentro de un rango apropiado.

Otra alternativa para evitar una sobrecompensación, consiste en instalar los capacitores junto con las cargas, de tal forma que sólo estén en servicio

cuando éstas estén conectadas. Esta solución, generalmente más costosa, se llega a justificar en equipos de capacidad importante.

- *Con los registros de analizadores de redes.*

Con la utilización de estos instrumentos en los puntos que se seleccionen del sistema, se pueden tener todos los valores necesarios, con los intervalos adecuados, para calcular los bancos de capacitores fijos o regulados, teniendo en cuenta las variaciones de la carga, la regulación de tensión, etc.

- *A partir de los parámetros eléctricos de la instalación.*

Para nuevas instalaciones, el cálculo de la capacidad de los bancos de capacitores se realiza efectuando el balance de la potencia activa y reactiva de todos los receptores de la instalación, teniendo en cuenta los factores de utilización, de coincidencia y otros. Con esos resultados, se calculan los valores totales de P y Q y se determina el factor de potencia.

- *Mediante técnicas computacionales.*

Los condensadores son ampliamente usados en los sistemas de distribución para reducir las pérdidas de energía, liberar capacidad en el sistema y mantener un perfil de voltaje dentro de los límites permisibles. La calidad de estas prestaciones depende de la posición, tamaño, el tipo y número de los condensadores. La localización óptima de condensadores, así como la determinación de la capacidad adecuada a emplear, se hace notablemente difícil si se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Carga no uniformemente distribuida.
- Distintos niveles de carga en función del tiempo.
- Presencia de diferentes calibres de conductores a lo largo del circuito.
- Existencia de numerosas ramificaciones.
- Pérdidas de potencia en líneas y transformadores.
- Redes de distribución con configuración en Radial o alimentación en más de un nodo.

2.6 Consideraciones para la localización de los capacitores.

Como se ha indicado, la forma más práctica y económica para corregir el factor de potencia, es mediante capacitores de potencia, los cuales se pueden situar en distintos puntos de una instalación eléctrica. De esta forma, los

generadores, cables, transformadores y demás elementos del sistema se descargan del reactivo circulante. Mientras más cerca se conecten de la carga por compensar, mayor es el beneficio que reportan, ya que la potencia reactiva es confinada a segmentos pequeños de la instalación. El caso ideal sería emplazar los capacitores junto a cada carga inductiva, pero debido al alto costo que esto representa, se opta por soluciones intermedias. De la selección y ubicación de los equipos de compensación dependen su costo y la magnitud de las pérdidas de energía eléctrica.

La localización de los capacitores en la red se determina según:

- El objetivo buscado: supresión de las penalizaciones por bajo factor de potencia; reducción de la carga en líneas y transformadores; aumento de la tensión en los extremos de las líneas; etc.
- El régimen de carga.
- Las influencias de los capacitores en la red.
- El costo de la instalación.

Siempre que sea posible, los capacitores deben localizarse lo más cerca posible de la carga en el nivel de baja tensión. La mejoría del factor de potencia, la liberación de capacidad eléctrica, la reducción de las pérdidas de potencia y de las caídas de tensión se hacen efectivas desde el punto de ubicación hacia la fuente de suministro.

Las principales ubicaciones que pueden tener los capacitores dentro de un circuito industrial son las siguientes:

- 1) En los bornes de motores asincrónicos (unidad motor-capacitor).
- 2) En las pizarras de fuerza de de baja tensión.
- 3) En los centros generales de distribución de baja tensión.
- 4) En el centro general de distribución de media tensión.

La mayoría de las instalaciones industriales contienen un gran número de cargas pequeñas que no son adecuadas para compensar mediante capacitores, que por ser fabricados en tamaños estándar no se adaptan a las necesidades de reactivo de dichas cargas. Por otra parte, no todas estas cargas están conectadas permanentemente a la red, por lo que es posible sacar ventaja del factor de diversidad de dichas cargas con una localización centralizada. Por ejemplo, si solo el 50% de la carga está conectada en cada momento, el banco de capacitores solo requiere la mitad de la potencia reactiva

necesaria para compensar el total de la carga. Por otra parte, la tensión del sistema influye en la localización de los capacitores. Un capacitor de 230 V cuesta más de dos veces lo que cuesta esa misma capacidad a una tensión de 460 - 575 V. Por otra parte, aún cuando las unidades de 2400 V son las más económicas, los bancos dotados de desconectivos adecuados de media tensión, cuestan más que los de 460 – 575 V para las aplicaciones industriales prácticas, debido al costo adicional de los desconectivos de 2400 V.

Compensación en los centros generales de distribución.

La potencia reactiva de un número de cargas de distintas capacidades y diferentes períodos de conexión, puede ser compensada con un banco único de capacitores, con lo que se tiene una mejor utilización de su potencia y se mejora en general el nivel de tensión. Sin embargo, con esta variante no se reducen las pérdidas en el sistema eléctrico de la instalación aguas abajo. Usualmente, resulta más conveniente desde el punto de vista económico instalar capacitores en el lado de alta, especialmente si $kVARC > 800$. La compensación centralizada con bancos de media tensión (6,6 kV o 13,8 kV) requiere de menos espacio y es más barata por KVAR, además de que pueden ser instalados a la intemperie. Sin embargo, como se expresó anteriormente, los medios de accionamiento y control a baja tensión son más baratos. Por otro lado, si el por ciento de potencia reactiva capacitiva instalada es muy elevada, la falla del banco afecta más sustancialmente el factor de potencia, conduciendo a penalizaciones.

Otra problema de la compensación por el lado de alta es que si se requiere aumentar la capacidad de carga de los transformadores, debe procurarse instalar los capacitores en el lado de baja, para disminuir la corriente reactiva que pasa por ellos. La compensación puede ser fija o automática. Valores indicativos para la selección entre estas dos variantes se realiza comparando la capacidad del banco (QC) con la potencia del transformador (SN). Entonces, se recomienda:

- si $QC/SN = 15 \%$, la compensación es fija.
- si $QC/SN > 15 \%$, la compensación es automática o mixta.

En el caso de la compensación fija, se recomienda que la potencia de los capacitores no exceda, aproximadamente, el 10 % de la capacidad del

transformador, con lo que se evitan problemas de resonancia y se reducen las pérdidas cuando trabaja en vacío.

2.7 Significado de la compensación en redes de alimentación.

Los transformadores, motores, etc. son consumidores inductivos. Para la formación de su campo magnético estos toman potencia inductiva o reactiva de la red de alimentación, Esto significa para las plantas generadores de energía eléctrica una carga especial, que aumenta cuanto más grande es y cuanto mayor es el desfase. Esta es la causa por la cual se pide a los consumidores o usuarios mantener un factor de potencia cercano a 1. Los usuarios con una alta demanda de potencia reactiva son equipados con contadores de potencia reactiva (vatiómetro o vatímetro de potencia desvatada).

La demanda de potencia reactiva se puede reducir sencillamente colocando condensadores en paralelo a los consumidores de potencia inductiva Q_L . Dependiendo de la potencia reactiva capacitiva Q_C de los condensadores se anula total o parcialmente la potencia reactiva inductiva tomada de la red. A este proceso se le denomina compensación.

Después de una compensación la red suministra solamente (casi) potencia real. La corriente en los conductores se reduce, por lo que se reducen las pérdidas en éstos. Así se ahorran los costos por consumo de potencia reactiva facturada por las centrales eléctricas. Con la compensación se reducen la potencia reactiva y la intensidad de la corriente, quedando la potencia real constante, es decir, se mejora el factor de potencia.

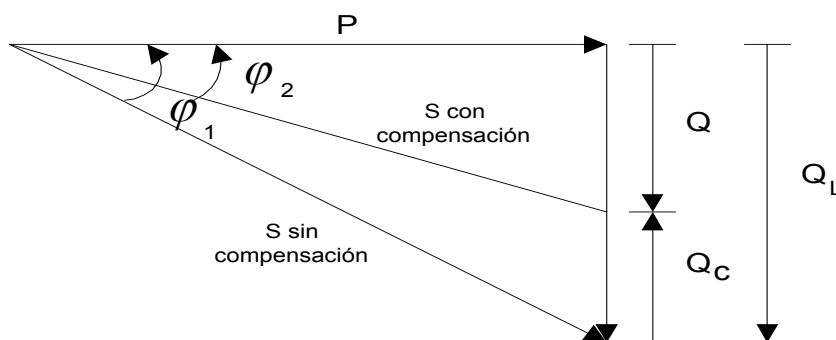


Fig.2.7 Triangulo de potencias

La figura 2.7 muestra el triangulo de potencia, en el se refleja el alto consumo de potencia aparente por un circuito que posea un bajo factor de potencia, este alto consumo puede ser disminuido considerablemente, con solo añadirles elementos compensadores de reactivos al circuito en cuestión, al agregar un elemento compensador, como capacitores, este produce la energía capacitiva necesaria Q_c , la cual anula total o parcialmente la potencia reactiva inductiva tomada de la red. Por tanto la potencia inductiva disminuye considerablemente, logrando así un menor consumo de potencia aparente por el circuito, reduciendo con ello las perdidas y la factura eléctrica mensual.

2.8 Control de los bancos de capacitores.

Los bancos de capacitores se clasifican por su modo de operación en bancos fijos y bancos controlados. Los bancos fijos están permanentemente conectados al sistema, aportando el total de su potencia reactiva en todo momento. Esto puede traer algunos inconvenientes, debido a la variabilidad de la carga en el tiempo, ya que en períodos de carga reducida, la potencia reactiva capacitiva puede superar la de la carga y la empresa se convierte en un generador de potencia reactiva al sistema. En estas condiciones, pueden aparecer sobretensiones en algunos puntos del sistema de distribución industrial o de servicio e, incluso, las pérdidas pueden aumentar por la transferencia en sentido inverso de esta potencia reactiva. Es por esto que se emplean bancos compuestos por una o varias unidades capacitivas que se conectan o desconectan por determinada estrategia, que pueden ser:

- 1) Controlados por tiempo.
- 2) Controlados por tensión.
- 3) Controlados por corriente.
- 4) Controlados por factor de potencia.

Control por tiempo.

Este es el tipo de control más sencillo y barato. Normalmente es un control on/off que se programa para que todos los días conecte el banco solo en el período de tiempo en que resulte más necesario el reactivo, evitando la sobrecompensación en el resto del día.

Control por tensión.

El control por tensión puede emplearse cuando la tensión en el punto de conexión del capacitor se reduce ante un incremento de la carga. Requiere una señal de tensión y tiene la ventaja de evitar cualquier tipo de sobretensión debido a los capacitores, pero no sigue exactamente el ciclo de carga reactiva.

Control por corriente.

Se utiliza cuando la variación de tensión con el incremento de la carga es muy baja para utilizar un control como el anterior. Es efectivo cuando la carga máxima del circuito supera dos o tres veces la carga mínima y generalmente se emplea en circuitos con grandes cargas, que funcionan intermitentemente. El sensor debe medir la corriente en el lado de la carga.

Control por factor de potencia.

El control por factor de potencia es uno de los más empleados actualmente en los centros generales de distribución de baja tensión de las industrias e instalaciones de servicio. Se basa en obtener señales de tensión y corriente de la red que permiten determinar el factor de potencia y, por lo tanto, controlar este parámetro a un valor prefijado.

En forma general, este tipo de banco está compuesto por una batería de capacitores de igual o diferente capacidad, que se conectan y desconectan por contactores magnéticos para seguir la curva de carga reactiva y lograr mantener el factor de potencia de la instalación lo más cercano posible al valor prefijado.

El regulador electrónico de este tipo de banco de capacitores, se ajusta a partir de dos parámetros fundamentales:

- 1) El factor de potencia deseado.
- 2) La relación C/K.

Al seleccionarse el banco de capacitores, debe tenerse en cuenta que para mantener el factor de potencia en el valor deseado, el banco tiene que tener una potencia total mayor que la necesaria para obtener dicho factor de potencia en el horario de máxima demanda.

Por su parte, la relación C/K es un parámetro de ajuste que representa la relación entre la corriente reactiva del primer escalón del banco y la relación del transformador de corriente empleado (I_1^{rio}/I_2^{rio}).

$$C / K = \frac{Q_1 / (\sqrt{3} U_n)}{I_1^{rio} / I_2^{rio}}$$

Es decir, que el C/K no es más que la corriente reactiva del primer escalón (unidad de menor capacidad del banco), referida al secundario del transformador de corriente. El valor de C/K, o de la corriente del primer escalón, constituye un nivel de referencia para conectar o desconectar unidades. El regulador ordena conectar nuevas unidades, si el incremento de corriente reactiva necesaria para obtener el factor de potencia deseado es superior a C/K; mientras que decide desconectar unidades, si la reducción de corriente reactiva calculada es superior a C/K.

Un valor muy bajo de C/K provoca una hipersensibilidad del control, sucediéndose continuas conexiones y desconexiones de unidades, con un trabajo excesivo de los contactores. Por el contrario, un valor muy alto de C/K provocaría la insensibilidad del control, no lográndose obtener el factor de potencia deseado.

2.9 Tipos de compensación.

- ***Compensación individual.***

La compensación individual se refiere a que cada consumidor de potencia inductiva se le asigna un capacitor que suministre potencia reactiva para su compensación. La compensación individual es empleada principalmente en equipos que tienen una operación continua y cuyo consumo inductivo es representativo. A continuación se describen dos métodos de compensación individual:

Compensación individual en motores eléctricos.

El método de compensación individual es el tipo de compensación más efectivo ya que el capacitor se instala en cada una de las cargas inductivas a corregir, de manera que la potencia reactiva circule únicamente por los conductores cortos entre el motor y el capacitor.

El mejoramiento del factor de potencia en cargas tipo motor mediante el uso de bancos de capacitores ha sido una práctica industrial corriente, lo cual se debe a las características de los motores asíncronos como consumidores de potencia reactiva.

El factor de potencia de un motor asíncrono es bastante bueno a plena carga (0.8 – 0.9), dependiendo del tipo de motor, su potencia y su velocidad. Sin embargo, para cargas inferiores a la de chapa, el factor de potencia del motor cae rápidamente hasta valores cercanos al 10 – 20 % sin carga.

Este comportamiento de los motores asíncronos, los hace atractivos para compensar la potencia reactiva, lo que corrientemente se realiza para obtener un factor de potencia de 0.8- 0.95 a carga parcial y a plena carga respectivamente. Además, hay que tener en cuenta que la adición de capacitores en los bornes de un motor no altera en nada sus características operacionales.

Desde el punto de vista económico, usualmente se justifica la instalación de bancos individuales en el caso de motores de mediana y gran potencia, de preferencia con ciclos de trabajo de duración significativa, y de tal forma que los capacitores tengan un alto factor de servicio. En estos casos, la compensación es fija. Este tipo de compensación tiene como ventajas:

- El factor de potencia se corrige localmente, de manera que los transformadores y alimentadores pueden ser utilizados a más plena capacidad.
- Con un dimensionamiento correcto, hay una probabilidad más reducida de problemas de resonancia.
- Menores problemas de transientes producidos durante la operación de interruptores.
- Mantenimiento más fácil y barato.

Deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

1) Compensar en los motores que funcionan más tiempo al día, de forma que el efecto de los capacitores sea más efectivo en el sistema y sobre todo en el horario de máxima demanda.

2) No conectar directamente capacitores a los motores:

- ✓ Que utilizan arrancadores de estado sólido (electrónicos).

- ✓ Que utilizan arrancadores que realizan transiciones entre contactos, dejando temporalmente desconectado al motor.
- ✓ Que están sujetos a arranques, aceleraciones o frenajes frecuentes
- ✓ Con velocidades múltiples.
- ✓ Con inversión del sentido de giro.
- ✓ Que mueven cargas mecánicas de alta inercia.

La conexión mas usada en la industria es la conexión del capacitor a la barra general de alimentación del conjunto de motores, es decir se emplea cuando se desea mantener el capacitor permanentemente conectado a la barra. La única ventaja de la misma es que al compartir el desconectivo del motor, la instalación es más barata.

No obstante, este método presenta las siguientes desventajas:

- El costo de varios capacitores por separado es mayor que el de un capacitor individual de valor equivalente.
- Existe subutilización para aquellos capacitores que no son usados con frecuencia.
- Los capacitores son instalados cerca de la carga inductiva, la potencia reactiva es confinada al segmento más pequeño posible de la red.
- El arrancador para el motor puede también servir como un interruptor para el capacitor eliminando así el costo de un dispositivo de control del capacitor solo.
- El uso de un arrancador proporciona control semiautomático para los capacitores, por lo que no son necesarios controles complementarios.
- Los capacitores son puestos en servicio sólo cuando el motor está trabajando.
- Todas las líneas quedan descargadas de la potencia reactiva

Es importante mencionar que para no incurrir en una sobre compensación de la potencia inductiva que provoque alteraciones en el voltaje que puedan dañar la instalación eléctrica, la potencia del banco de capacitores deberá limitarse al 90% de la potencia reactiva del motor en vacío.

Compensación individual en transformadores de distribución.

Otro método para corregir el factor de potencia es compensar la potencia reactiva en los transformadores de distribución. La potencia total del banco de capacitores se calcula para compensar la potencia reactiva absorbida por el transformador en vacío, que es del orden del 5 al 10% de la potencia nominal.

De acuerdo con las normas técnicas para instalaciones eléctricas, con el fin de evitar fenómenos de resonancia y sobretensión en vacío, la potencia total del banco de capacitores no debe exceder el 10% de la potencia nominal (en kVA) del transformador.

Compensación en grupo.

Es aconsejable compensar la potencia inductiva de un grupo de cargas, cuando éstas se conectan simultáneamente y demandan potencia reactiva constante, o bien cuando se tienen diversos grupos de cargas situados en puntos distintos. La compensación en grupo presenta las siguientes ventajas:

- Se conforman grupos de cargas de diferente potencia pero con un tiempo de operación similar, para que la compensación se realice por medio de un banco de capacitores común con su propio interruptor.
- Los bancos de capacitores pueden ser instalados en el centro de control de motores.
- El banco de capacitores se utilizan únicamente cuando las cargas están en uso.
- Se reducen costos de inversión para la adquisición de bancos de capacitores.
- Es posible descargar de potencia reactiva las diferentes líneas de distribución de energía eléctrica.

La desventaja es que la sobrecarga de potencia reactiva no se reduce en las líneas de alimentación principal, es decir, que seguirá circulando energía reactiva entre el centro de control de motores y los motores.

Compensación central con banco automático.

Este tipo de compensación ofrece una solución generalizada para corregir el factor de potencia ya que la potencia total del banco de capacitores se instala en la acometida, cerca de los tableros de distribución de energía, los cuales, suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación. La potencia total del banco de capacitores se divide en varios bloques que están conectados a un regulador automático de energía reactiva, que conecta y desconecta los bloques que sean necesarios para obtener el factor de potencia previamente programado en dicho regulador. La compensación centralizada presenta las siguientes ventajas:

- Mejor utilización de la capacidad de los bancos de capacitores.
- Se tiene una mejora en la regulación del voltaje en sistema eléctrico.
- Suministro de potencia reactiva según los requerimientos del momento.
- Es de fácil supervisión.

La desventaja de corregir el factor de potencia mediante la compensación centralizada, es que las diversas líneas de distribución no son descargadas de la potencia reactiva, además, se requiere de un regulador automático el banco de capacitores para compensar la potencia reactiva, según las necesidades de cada momento.

Compensación mixta.

En el caso de las instalaciones en las que se tienen grandes motores u otras cargas con un gran consumo de reactivo, en comparación con el resto de las cargas, suele ser conveniente combinar las variantes anteriores. Por ejemplo, compensando individualmente las cargas de gran capacidad y para las restantes, instalar bancos de capacitores para compensación en los centros de distribución de motores de baja tensión y en los centros generales de distribución. La compensación mixta o combinada de potencia reactiva, se refiere a la combinación de dos o más métodos para corregir el factor de potencia, que fueron descritos anteriormente. Tiene como desventaja que puede ocasionar una sobrecompensación.

2.10 Selección del método a implementar para la corrección del factor de potencia.

En los últimos años la planificación de la compensación de la potencia reactiva se ha tratado mediante métodos heurísticos, que incluyen técnicas de Inteligencia Artificial. Los métodos heurísticos más empleados para estos fines han sido los Algoritmos Genéticos

Los **Algoritmos Genéticos (AG)** son un conjunto de técnicas de búsqueda basadas en la mecánica de una serie de pasos organizados que describe el proceso que se debe seguir, para dar solución a un problema específico.

En el trabajo publicado por Hugh se presenta un algoritmo para el cálculo de la compensación de la potencia reactiva con el uso de Algoritmos Genéticos. Aquí se toman en consideración las pérdidas económicas asociadas a la potencia reactiva y los costos de inversión para compensarla. En esta aplicación se debe seguir de cerca la diversidad de la población obtenida que puede degenerarse a partir de los cruzamientos y originar soluciones de baja calidad.

Desde hace ya algunos años se ha estado trabajando el calculo de la potencia reactiva de bancos de condensadores por medio de la computación evolutiva, y dentro de esta, la rama de los algoritmos evolutivos, haciendo un énfasis particularidad en el del tipo genético. Después de haber analizado varios métodos, se llegó a la conclusión de que se utilizaría el método de los algoritmos genéticos, los cuales constituyen una de las técnicas de la inteligencia artificial que permiten resolver problemas de optimización, con un elevado grado de complejidad y del cual solo se requiere conocer la función objetivo a optimizar. Estas y otras cualidades los hacen ser una técnica preferida para el cálculo de la capacidad óptima de bancos de condensadores. El nivel de modernidad y adaptabilidad que han alcanzado las redes de distribución obligan a la implementación de métodos que permitan el análisis de las mismas considerando la mala conformación del sistema de ecuaciones que las describe.

CAPITULO 3: Aplicación del método seleccionado

3.1 Aspectos generales de los algoritmos genéticos.

3.2 El problema de la optimización de la compensación reactiva en sistemas eléctricos. Aplicación con MATLAB.

3.3 Aplicación de Algoritmo Genético a la determinación óptima del banco de capacitores en la empresa de productos lácteos de las tunas.

3. 4 Valoración económica el proyecto.

3.5 Conclusiones.

INTRODUCCIÓN

A medida que los sistemas eléctricos de potencia crecen, la compensación reactiva se hace cada vez más necesaria para lograr los niveles adecuados de tensión y capacidad de transmisión. La forma clásica de solucionar este problema es por tanteos mediante repetidos flujos de carga, ayudándose de la experiencia del los ingenieros de planeamiento hasta encontrar una solución satisfactoria, ésta no permite garantizar que dicha solución sea la óptima. Desde 1968, se empezó a estudiar una forma sistemática de solucionar el problema, surgiendo diferentes metodologías, diferenciándose mayormente en los métodos matemáticos utilizados, entre ellas se encuentran la programación lineal, programación no lineal y recientemente los algoritmos genéticos. El presente trabajo está dirigido al estudio de la asignación óptima de compensación reactiva en sistemas eléctricos de potencia mediante un programa computacional basado en algoritmos genéticos, con características similares a las de otros programas para PC disponibles a nivel mundial. Cabe mencionar que por tener acceso al código fuente es posible mejorarlo y adaptarlo a nuevos requerimientos asociados a los sistemas eléctricos de potencia.

3.1 Aspectos generales de los algoritmos genéticos

3.1.1 Breve historia de los algoritmos genéticos.

En 1945, por primera vez en la historia, se concedió una patente a un invento no realizado directamente por un ser humano: se trata de una antena de forma extraña, pero que funciona perfectamente en las condiciones a las que estaba destinada. No hay, sin embargo, nada injusto en el hecho de que el autor del algoritmo genético del que salió la forma de la antena se haya atribuido la autoría de la patente, pues él escribió el programa e ideó el criterio de selección que condujo al diseño patentado.

Un algoritmo genético es un método de búsqueda dirigida basada en probabilidad. Bajo una condición muy débil (que el algoritmo mantenga **elitismo**, es decir, guarde siempre al mejor elemento de la población sin hacerle ningún cambio) se puede demostrar que el algoritmo converge en probabilidad al óptimo. En otras palabras, al aumentar el número de iteraciones, la probabilidad de tener el óptimo en la población tiende a 1 (uno).

Los primeros ejemplos de lo que hoy podríamos llamar algoritmos genéticos aparecieron a finales de los 50 y principios de los 60, programados en computadoras por biólogos evolutivos que buscaban explícitamente realizar modelos de aspectos de la evolución natural. A ninguno de ellos se le ocurrió que esta estrategia podría aplicarse de manera más general a los problemas artificiales, pero ese reconocimiento no tardaría en llegar: "La computación evolutiva estaba definitivamente en el aire en los días formativos de la computadora electrónica" (Mitchell 1996). En 1962, investigadores como G.E.P. Box, G.J. Friedman, W.W. Bledsoe y H.J. Bremermann habían desarrollado independientemente algoritmos inspirados en la evolución para optimización de funciones y aprendizaje automático, pero sus trabajos generaron poca reacción. En 1965 surgió un desarrollo más exitoso, cuando Ingo Rechenberg, entonces de la Universidad Técnica de Berlín, introdujo una técnica que llamó estrategia evolutiva, aunque se parecía más a los trepa colinas que a los algoritmos genéticos. En esta técnica no había población ni cruzamiento; un padre mutaba para producir un descendiente, y se conservaba el mejor de los

dos, convirtiéndose en el padre de la siguiente ronda de mutación (Haupt y Haupt 1998, p.146). Versiones posteriores introdujeron la idea de población. Las estrategias evolutivas todavía se emplean hoy en día por ingenieros y científicos, sobre todo en Alemania.

El siguiente desarrollo importante en el campo vino en 1966, cuando L.J. Fogel, A.J. Owens y M.J. Walsh introdujeron en América una técnica que llamaron programación evolutiva. En este método, las soluciones candidatas para los problemas se representaban como máquinas de estado finito sencillas; al igual que en la estrategia evolutiva de Rechenberg, su algoritmo funcionaba mutando aleatoriamente una de estas máquinas simuladas y conservando la mejor de las dos (Mitchell 1996; Goldberg 1989). También al igual que las estrategias evolutivas, hoy en día existe una formulación más amplia de la técnica de programación evolutiva que todavía es un área de investigación en curso. Sin embargo, lo que todavía faltaba en estas dos metodologías era el reconocimiento de la importancia del cruzamiento.

En una fecha tan temprana como 1962, el trabajo de John Holland sobre sistemas adaptativos estableció las bases para desarrollos posteriores; y lo que es más importante, Holland fue también el primero en proponer explícitamente el cruzamiento y otros operadores de recombinación. Sin embargo, el trabajo fundamental en el campo de los algoritmos genéticos apareció en 1975, con la publicación del libro ``Adaptación en Sistemas Naturales y Artificiales''. Basado en investigaciones y papers anteriores del propio Holland y de colegas de la Universidad de Michigan, este libro fue el primero en presentar sistemática y rigurosamente el concepto de sistemas digitales adaptativos utilizando la mutación, la selección y el cruzamiento, simulando el proceso de la evolución biológica como estrategia para resolver problemas. El libro también intentó colocar los algoritmos genéticos sobre una base teórica firme introduciendo el concepto de esquema. Ese mismo año, la importante tesis de Kenneth De Jong estableció el potencial de los AGs demostrando que podían desenvolverse bien en una gran variedad de funciones de prueba, incluyendo paisajes de búsqueda ruidosos, discontinuos y multimodales.

Estos trabajos fundacionales establecieron un interés más generalizado en la computación evolutiva. Entre principios y mediados de los 80, los algoritmos genéticos se estaban aplicando en una amplia variedad de áreas, desde problemas matemáticos abstractos como el "problema de la mochila" (bin-packing) y la coloración de grafos hasta asuntos tangibles de ingeniería como el control de flujo en una línea de ensamble, reconocimiento y clasificación de patrones y optimización estructural.

Al principio, estas aplicaciones eran principalmente teóricas. Sin embargo, al seguir proliferando la investigación, los algoritmos genéticos migraron hacia el sector comercial, al cobrar importancia con el crecimiento exponencial de la potencia de computación y el desarrollo de Internet. Hoy en día, la computación evolutiva es un campo floreciente, y los algoritmos genéticos están "resolviendo problemas de interés cotidiano" en áreas de estudio tan diversas como la predicción en la bolsa y la planificación de la cartera de valores, ingeniería aeroespacial, diseño de microchips, bioquímica y biología molecular, y diseño de horarios en aeropuertos y líneas de montaje. La potencia de la evolución ha tocado virtualmente cualquier campo que uno pueda nombrar, modelando invisiblemente el mundo que nos rodea de incontables maneras, y siguen descubriéndose nuevos usos mientras la investigación sigue su curso. Y en el corazón de todo esto se halla nada más que la simple y poderosa idea de Charles Darwin: que el azar en la variación, junto con la ley de la selección, es una técnica de resolución de problemas de inmenso poder y de aplicación casi ilimitada.

En los años 1970, de la mano de **John Henry Holland**, surgió una de las líneas más prometedoras de la inteligencia artificial, la de los algoritmos genéticos. Son llamados así porque se inspiran en la evolución biológica y su base genético-molecular. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una Selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles los menos aptos, que son descartados. También es denominado algoritmos

evolutivos, e incluye las estrategias de evolución, la programación evolutiva y la programación genética. Dentro de esta última se han logrado avances curiosos.

3.1.2 Introducción a los Algoritmos Genéticos.

Como ya hemos mencionado anteriormente, los algoritmos genéticos ocupan el lugar central dentro de la computación evolutiva. Las razones de esta preeminencia son tanto teóricas como prácticas, siendo las más importantes:

- Los algoritmos genéticos constituyen el paradigma más completo de la computación evolutiva, esto es, resumen de modo natural, todas las ideas fundamentales de dicho enfoque.
- Son muy flexibles, es decir, pueden adoptar con facilidad nuevas ideas, generales o específicas, que surjan dentro del campo de la computación evolutiva. Además se pueden hibridar fácilmente con otros paradigmas y enfoques, aunque no tengan ninguna relación con la computación evolutiva.
- Los algoritmos genéticos son el paradigma con mayor base teórica de entre los de la computación evolutiva. Además, dicha base teórica es sencilla en su desarrollo y con grandes posibilidades de ampliación.
- De entre todos los paradigmas de la computación evolutiva son los que menos conocimiento específico necesitan para su funcionamiento, y en consecuencia, los más versátiles. Pero es que además pueden incorporar conocimiento específico con poco esfuerzo adicional.
- Son fácilmente implementables en computadores con capacidades medias, proporcionando resultados aceptables, en cuanto a precisión y recursos empleados, para una gran cantidad de problemas difícilmente resolubles por otros métodos.
- Existe una gran cantidad de ensayos empíricos que proporcionan operadores, parámetros e implementaciones específicas para una amplia gama de problemas.

3.1.3 ¿Qué es un algoritmo genético?

Después de enumerar estas características podríamos definir los algoritmos genéticos, de forma general, como "métodos estocásticos de búsqueda ciega

de soluciones casi-óptimas. En ellos se mantiene una población que representa un conjunto de posibles soluciones, la cual es sometida a ciertas transformaciones con las que se trata de obtener nuevos candidatos, y un proceso de selección sesgado en favor de los mejores candidatos".

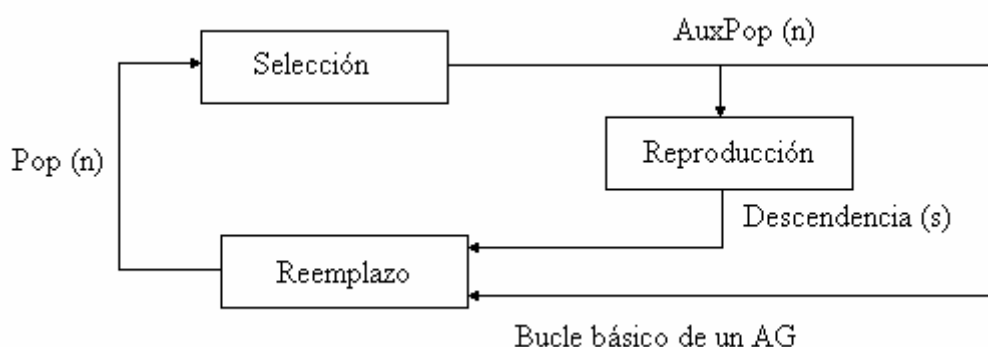
Decimos que la búsqueda es ciega porque no se dispone de ningún conocimiento específico del problema, de manera que la búsqueda se basa exclusivamente en los valores de la función objetivo. Es también una búsqueda codificada, ya que no se trabaja directamente sobre el dominio del problema, sino con representaciones de sus elementos; múltiple, porque busca simultáneamente entre un conjunto de candidatos; y estocástica, referida tanto a las fases de selección como a las de transformación, con lo que se obtiene control sobre el factor de penetración de la búsqueda. Todo esto hace que los algoritmos genéticos proporcionen una mayor robustez a la búsqueda, esto es, más eficiencia sin perder generalidad. Expuesto concisamente, un algoritmo genético es una técnica de programación que imita a la evolución biológica como estrategia para resolver problemas. Dado un problema específico a resolver, la entrada del AG es un conjunto de soluciones potenciales a ese problema, codificadas de alguna manera, y una métrica llamada función de aptitud que permite evaluar cuantitativamente a cada candidata. Estas candidatas pueden ser soluciones que ya se sabe que funcionan, con el objetivo de que el AG las mejore, pero se suelen generar aleatoriamente. Luego el AG evalúa cada candidata de acuerdo con la función de aptitud. En un acervo de candidatas generadas aleatoriamente, por supuesto, la mayoría no funcionarán en absoluto, y serán eliminadas. Sin embargo, por puro azar, unas pocas pueden ser prometedoras, pueden mostrar actividad, aunque sólo sea actividad débil e imperfecta, hacia la solución del problema.

Estas candidatas prometedoras se conservan y se les permite reproducirse. Se realizan múltiples copias de ellas, pero las copias no son perfectas; se introducen cambios aleatorios durante el proceso de copia. Luego, esta descendencia digital prosigue con la siguiente generación, formando un nuevo acervo de soluciones candidatas, y son sometidas a una ronda de evaluación de aptitud. Las candidatas que han empeorado o no han mejorado con los

cambios en su código son eliminadas de nuevo; pero, de nuevo, por puro azar, las variaciones aleatorias introducidas en la población pueden haber mejorado a algunos individuos, convirtiéndolos en mejores soluciones del problema, más completas o más eficientes. De nuevo, se seleccionan y copian estos individuos vencedores hacia la siguiente generación con cambios aleatorios, y el proceso se repite. Las expectativas son que la aptitud media de la población se incrementará en cada ronda y, por tanto, repitiendo este proceso cientos o miles de rondas, pueden descubrirse soluciones muy buenas del problema. Aunque a algunos les puede parecer asombroso y antiintuitivo, los algoritmos genéticos han demostrado ser una estrategia enormemente poderosa y exitosa para resolver problemas, demostrando de manera espectacular el poder de los principios evolutivos. Se han utilizado algoritmos genéticos en una amplia variedad de campos para desarrollar soluciones a problemas tan difíciles o más difíciles que los abordados por los diseñadores humanos. Además, las soluciones que consiguen son a menudo más eficientes, más elegantes o más complejas que nada que un ingeniero humano produciría.

3.1.4 Estructura y componentes básicos de los algoritmos genéticos.

El siguiente gráfico muestra la estructura genérica de del bucle básico de un algoritmo genético:



Esquema No.1.1. Bucle básico de un algoritmo genético

El proceso se describe como sigue: una población Pop, que consta de (n) miembros se somete a un proceso de selección para constituir una población intermedia AuxPop de (n) criadores. De dicha población intermedia se extrae un grupo reducido de individuos llamados progenitores que son los que

efectivamente se van a reproducir. Sirviéndose de los operadores genéticos, los progenitores son sometidos a ciertas transformaciones de alteración y recombinación en la fase de reproducción, en virtud de las cuales se generan (s) nuevos individuos que constituyen la Descendencia. Para formar la nueva $Pop[t+1]$, se deben seleccionar (n) supervivientes de entre los (n+s) de la población auxiliar y la descendencia, lo que ocurre en la fase de reemplazo. El cuadrado rayado hace referencia a la selección, la cual se realiza en dos etapas con la idea de emular las dos vertientes del Principio de Selección Natural: selección de criadores o selección a secas, y selección de supervivientes para la próxima generación o reemplazo.

El proceso descrito, puede ser expresado de forma algorítmica del siguiente modo:

$t = 0$

Inicializar Población (t)

Evaluar Población (t)

Mientras (nos se verifique la condición de parada) hacer

$t = t + 1$

Seleccionar Población (t) a partir de Población (t-1)

Recombinar Población (t)

Evaluar Población (t)

Fin Mientras.

3.1.5 Terminología:

Generalmente cada individuo de la población se representa por medio de una cadena binaria de longitud fija, que suele denominarse 'ejemplar', 'muestra', 'punto' o 'cromosoma', la cual codifica los valores de las variables que intervienen en el problema. Representaremos un individuo por medio de x .

En el proceso de evaluación, lo que se hace es evaluar cada solución mediante una función (f) que nos da una medida de la adecuación o fitness de la misma. Así $f(x^t_i)$ es una medida de la bondad de la solución x_i en la iteración t . Cada individuo contribuye al proceso de reproducción en proporción a su correspondiente fitness. De esta forma, individuos bien adaptados, contribuyen

con múltiples copias e individuos mal adaptados contribuyen con pocas o incluso ninguna copia. Definimos como genotipo, a las estructuras que representan los individuos. Los caracteres o rasgos por los que están formados los individuos, se les denominan genes. Cada una de las posiciones de la cadena, es lo que se llama loci. Cada carácter o gen puede manifestarse de forma diferente, es decir, puede tomar distintos valores que son denominados alelos. Una estructura decodificada es un fenotipo.

3.1.6 Procedimientos básicos de un algoritmo genético.

Una vez vistos los principales mecanismos de muestreo, se pueden describir los tres procedimientos básicos de que consta un algoritmo genético: selección (de criadores), reproducción (o transformación) y reemplazo (o selección de supervivientes). Nótese que para implementar un algoritmo genético se requiere un mínimo de dos parámetros: el tamaño de la población n y el tamaño de la descendencia s .

Proceso de selección: consiste en muestrear, a partir de la población inicial, los n elementos de la población de criadores. El criterio concreto de muestreo depende del problema y del buen juicio del programador. Los más usados en la práctica son los muestreos por sorteo, universal y por torneos, en sus variedades conservadoras. Los muestreos deterministas se usan muy poco, entre otros motivos porque van en contra de la filosofía del método.

Proceso de reproducción: aplicando los operadores de transformación (cruce, mutación, inversión...), sobre ciertos miembros de la población de criadores se obtiene una descendencia de s nuevos miembros. Cuanto más grande sea el valor de s más variará la población de una generación a otra. Salvo indicación en contra, lo más común es trabajar con valores de s no mayores del 60% de n .

Existen dos grupos de operadores que nunca faltan en un algoritmo genético: el cruce y la mutación. Los operadores de cruce son el arquetipo de los operadores de recombinación: actúan sobre parejas de individuos y normalmente originan otro par de individuos que combinan características de

los progenitores. Dado que en los algoritmos genéticos los individuos están representados a través de cadenas, el cruce se lleva a cabo por intercambio de segmentos.

Los operadores de mutación, por su parte, son el arquetipo de operadores de alteración, dado que actúan sobre individuos en particular, realizando una pequeña modificación en alguno de sus genes o en el conjunto.

El motivo de hacer esta separación es el siguiente: entendiendo que la búsqueda propiamente dicha se lleva a cabo en la fase de reproducción, resulta conveniente diferenciar los operadores de búsqueda en profundidad de los de búsqueda en anchura: los primeros se encargarán de explotar las mejores características de que disponga la población actual, los otros se encargarán de explorar nuevos dominios en busca de mejores soluciones. Desde esta perspectiva, los operadores de cruce son los que principalmente se encargan de la búsqueda en profundidad y los de mutación de la búsqueda en anchura. Así, dando mayor importancia a unos o a otros se puede ajustar el tipo de búsqueda a las necesidades del problema.

Proceso de reemplazo: a partir de los (n) miembros de la población de criadores y de los s miembros de la población de descendientes se debe obtener una nueva población de n miembros. Para hacerlo existen diferentes criterios:

1. **Reemplazo inmediato** (o al vuelo): los (s) descendientes sustituyen a sus respectivos progenitores.
2. **Reemplazo con factor de llenado:** los s descendientes sustituyen a aquellos miembros de la población de criadores que más se les parezcan.
3. Reemplazo por inserción (o de tipo "coma"): según el tamaño relativo de la descendencia respecto de la población se distinguen dos casos:
 - a. $(s) < (n)$: se muestrean para ser eliminados s miembros de la población de criadores (normalmente los perores). Esos miembros serán sustituidos por los descendientes

- b. $(s) > n$: se muestrean (n) miembros de la población de descendientes y se constituye con ellos la nueva población. Nótese que con este modo cualquier individuo sólo puede sobrevivir a lo sumo una generación.

1. **Reemplazo por inclusión** (o de tipo "más"): se juntan los s descendientes con los n progenitores en una sola población, y en ella se muestrean n miembros (normalmente los mejores).

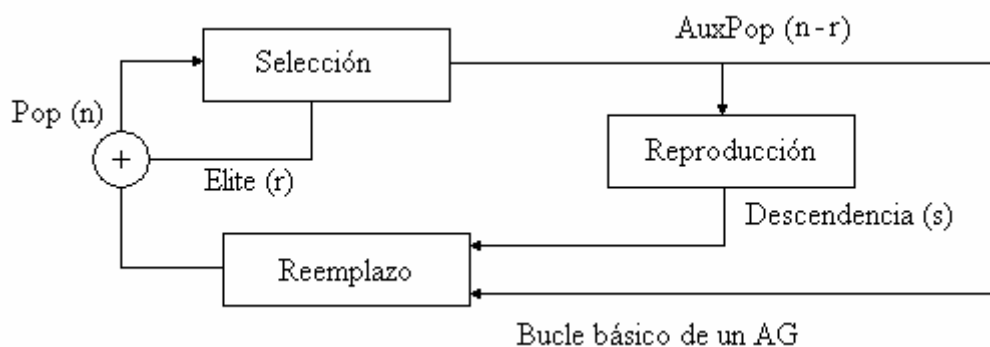
3.1.7 Elitismo.

El método más utilizado para mejorar la convergencia de los algoritmos genéticos es el elitismo. Consiste básicamente en realizar la etapa de selección en dos partes:

1. Se muestrea una élite de (r) miembros de entre los mejores de la población inicial y se incorporan directamente a la población final, sin pasar por la población intermedia.
2. La población auxiliar de criadores se muestrea de entre los $(n - r)$ restantes miembros de la población inicial.

Comúnmente, el tamaño de la élite r es bastante pequeño (1 ó 2 para $n=50$), y el tipo de muestreo es bien directo o bien por sorteo, ambos en la variedad diversa.

El esquema básico de un algoritmo genérico elitista puede ser como sigue:



Esquema # 2: Bucle básico de un algoritmo genético

Bajo ciertas condiciones muy generales, la introducción del elitismo garantiza la convergencia teórica al óptimo global; en la práctica, mejora la velocidad de convergencia de los algoritmos genéticos cuando la función de evaluación es unimodal (no hay subóptimos), sin embargo la velocidad de convergencia empeora con funciones fuertemente multimodales.

Con tamaños de población pequeños se consiguen efectos similares a los del elitismo introduciendo reinicializaciones periódicas en los algoritmos genéticos: cada vez que el algoritmo genético converge se salvan los mejores individuos, se reinician los demás y se vuelve a comenzar. La reinicialización tiene efectos beneficiosos sobre las prestaciones del método debido a que introduce diversidad, requisito especialmente crítico en los algoritmos genéticos con poblaciones pequeñas.

3.1.8 Métodos de cambio.

Una vez que la selección ha elegido a los individuos aptos, éstos deben ser alterados aleatoriamente con la esperanza de mejorar su aptitud para la siguiente generación. Existen dos estrategias básicas para llevar esto a cabo. La primera y más sencilla se llama mutación. Al igual que una mutación en los seres vivos cambia un gen por otro, una mutación en un algoritmo genético también causa pequeñas alteraciones en puntos concretos del código de un individuo. El segundo método se llama cruzamiento, e implica elegir a dos individuos para que intercambien segmentos de su código, produciendo una "descendencia" artificial cuyos individuos son combinaciones de sus padres. Este proceso pretende simular el proceso análogo de la recombinación que se da en los cromosomas durante la reproducción sexual. Las formas comunes de cruzamiento incluyen al cruzamiento de un punto, en el que se establece un punto de intercambio en un lugar aleatorio del genoma de los dos individuos, y uno de los individuos contribuye todo su código anterior a ese punto y el otro individuo contribuye todo su código a partir de ese punto para producir una descendencia, y al cruzamiento uniforme, en el que el valor de una posición dada en el genoma de la descendencia corresponde al valor en esa posición del genoma de uno de los padres o al valor en esa posición del genoma del otro padre, elegido con un 50% de probabilidad.

3.2 El problema de la optimización de la compensación reactiva en sistemas eléctricos. Aplicación con MATLAB.

Para el adecuado control de la potencia reactiva es necesario prever la instalación global de equipos de compensación con la suficiente anticipación considerando un conjunto de escenarios futuros. Dada la alta complejidad y dinamismo de los sistemas, el determinar el tipo, ubicación y dimensionamiento óptimo para los dispositivos de compensación hace dificultoso éste análisis por la gran cantidad de soluciones factibles. A su vez estos análisis deben asegurar una adecuada operación en el aspecto económico, de calidad y seguridad. Entre otros problemas se encuentra que los programas especializados para resolver este tipo de análisis no están accesibles a los profesionales y estudiantes, debido a sus altos costos de adquisición y requerimiento de computadoras de alta tecnología.

3.2.1 Dispositivos que influyen en el balance de potencia reactiva.

Para una adecuada generación y flujo de potencia reactiva se deben considerar:

- La variación de la tensión de generación.
- La variación de los taps en los transformadores.
- Conexión y desconexión de bancos de capacitores y reactores.
- Configuración de los compensadores estáticos (SVC).
- La configuración de la red y el despacho de generación.

3.2.2 Metodología de optimización.

En los últimos años se ha dado mucha atención al problema de obtener flujos de potencia óptimos y se han publicado diversos métodos de optimización en sistemas de potencia, cada una introduciendo nuevas técnicas, otras modificando los métodos matemáticos utilizados. Para el caso de manejo de potencia reactiva, se han utilizado técnicas que van desde el ensayo y error, pasando por el análisis de sensibilidades, y técnicas de optimización matemática muy diversas, siendo éste un área aún de investigación. Entre las técnicas utilizadas cabe destacar la programación lineal, programación no lineal

y los algoritmos genéticos. Dado que las ecuaciones de los flujos de potencia son problemas matemáticos convexos, las matemáticas convencionales tienden a converger a una solución local, no siendo el caso de los algoritmos genéticos que tienden a converger en soluciones globales. El segundo problema es la presencia de variables enteras en los sistemas de potencia reales (posiciones fijas de taps, cantidad de bancos de capacitores/reactores, posiciones de tensiones de generación), por lo que hace difícil la asignación de resultados directamente con las metodologías tradicionales. El tercer problema es el problema de convergencia, dado que la programación lineal y la no lineal pueden no converger por problemas de diversa índole, no siendo el caso de los algoritmos genéticos que siempre encuentran una solución. La alta versatilidad de la función objetivo en los algoritmos genéticos hace de éste una metodología atractiva para su análisis. Es por ello que la metodología seleccionada para la implementación del programa fueron los algoritmos genéticos mostrando efectividad en los resultados y facilidad en su implementación.

3.3 Aplicación de Algoritmo Genético a la determinación óptima del banco de capacitores en la empresa de productos lácteos de las tunas.

3.3.1 Formulación Global del Problema.

El problema global se puede definir como el de determinar óptimamente la capacidad de los condensadores a instalar en la empresa de productos lácteos de las tunas, sin perder de vista el objetivo de minimizar las pérdidas de energía en la red y en los condensadores, así como los costos de estos y la instalación de los mismos. Considerando que hay N posibles cantidad de condensadores, en dependencia de número de capacitores con los que se cuentan, la formulación del problema es la siguiente:

$$\text{Importe Total (IT)} = \text{ICF} + \text{ICV} + \text{IPERD} + \text{IFP} + k_c * C$$

Donde:

ICF: Importe por cargo fijo.

ICV: importe por cargo variable.

IPERD: importe por pérdidas.

IFP: importe por factor de Potencia.

Kc: costo del CkVAr instalado.

C: Capacidad total instalada de los condensadores en el sistema.

Restricciones.

La aplicación desarrollada esta basada como cualquier otro algoritmo genético en restricciones para la selección del mejor individuo, en este caso las restricciones aplicadas a dicha aplicación son las siguientes:

- Factor de potencia.
- Variación de pérdidas.
- Costo de los capacitores.

Para empresas, el factor de potencia debe tener un valor entre 0.9-0.96, para un aprovechamiento eficiente de la energía, por lo que esta restricción es muy importante en la resolución de este problema.

La variación de perdidas es un factor que se puede disminuir considerablemente, y con ello la factura eléctrica.

Restricciones Operacionales.

Las restricciones operacionales son expresadas en términos de las restricciones de magnitud de voltaje. Para redes de distribución bien diseñadas, cambios de las condiciones desbalanceadas de carga y de la demanda, sólo causan cambios sutiles en la variación de los voltajes. Por lo tanto, para un sistema debidamente equilibrado las restricciones de magnitud de voltaje pueden ser consideradas independientes del nivel de carga, como el sistema de suministro de la empresa es radial independiente, se puede considerar que:

$$V_{\min} = V_{\max}$$

Donde:

$V_{\min} = V_{\max}$ - tensión mínima y máxima permisibles respectivamente. De esta forma se garantiza que la tensión en cada una de las barras que conforman el sistema se encuentre dentro de ciertos límites preestablecidos.

Restricciones Técnicas Adicionales.

- Restricción de cantidad de condensadores:

En muchas ocasiones las compañías experimentan limitaciones del número de equipos. Esta restricción está representada a través del siguiente conjunto de desigualdades:

$$C_j = r_j; \quad r_j = 0$$

Donde:

C_j - condensador de capacidad j .

r_j - número máximo de unidades disponibles de condensadores de capacidad j .

Con esta restricción, que es opcional en el programa, se puede limitar las soluciones a la disponibilidad real de condensadores de los usuarios. En este caso no se tendrá en cuenta esta restricción porque como lo que se va a hacer es una instalación completa de un banco de capacitores y no una mejora de un banco existente, esta restricción no es importante.

El algoritmo de la Figura 3.3 explica la metodología propuesta para el cálculo de la capacidad del banco de condensadores por los datos obtenidos por el analizador de redes, se parte de los mismos, se calculan otros parámetros nominales adicionales, inicia el proceso iterativo principal y llega a un segundo bucle que puede causar variaciones en el factor de potencia indicado dependiendo de la relación entre la potencia activa y aparente.

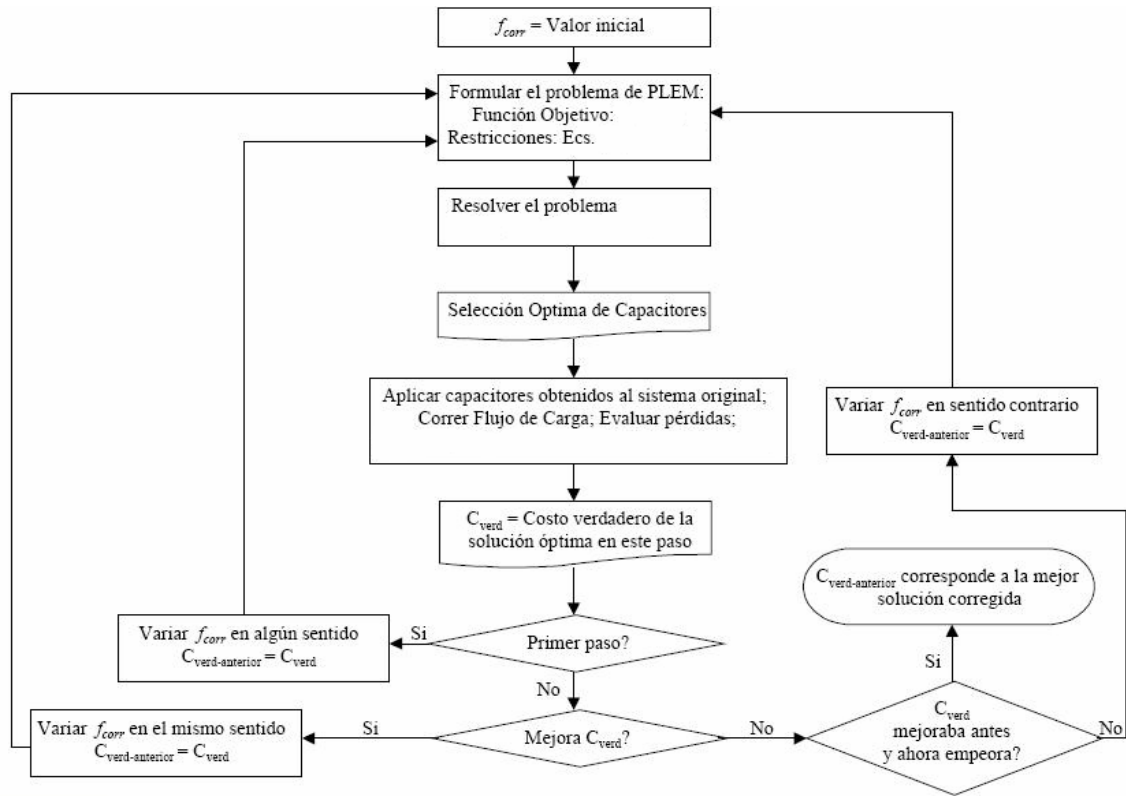


Fig. 3.3: Esquema de la aplicación desarrollada.

Una vez calculados los parámetros iniciales, le servirán al AG como vector para generar aleatoriamente la población inicial. Tomando los valores iniciales $x_0 = [x_{01} \cdots x_{0n}]$, donde n es la dimensión del número de variables, el límite inferior (lower bound) $LB = [LB_1 \cdots LB_n]$, límite superior (upper bound) $UB = [UB_1 \cdots UB_n]$, el tamaño de la población Np , la probabilidad de mutación Pm , la probabilidad de cruce Pc , se forma la población inicial.

3.3.2 Validación del Modelo.

Parte fundamental del estudio consiste en validar el modelo propuesto para ver su desempeño frente a diversas redes. Esto se hará a través de un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por la aplicación desarrollada y el programa DICSE, para las corridas de flujo de carga.

Validación del proceso de optimización.

En este punto se demuestra que la aplicación desarrollada obtiene de forma efectiva el óptimo global de la función que se analice. Para demostrar la

fiabilidad de la aplicación en sistemas de distribución, se realiza la corrida en un sistema de prueba de 8 barras en configuración radial independiente. La configuración y características del mismo se pueden apreciar en la [figura 1.4](#) del primer capítulo.

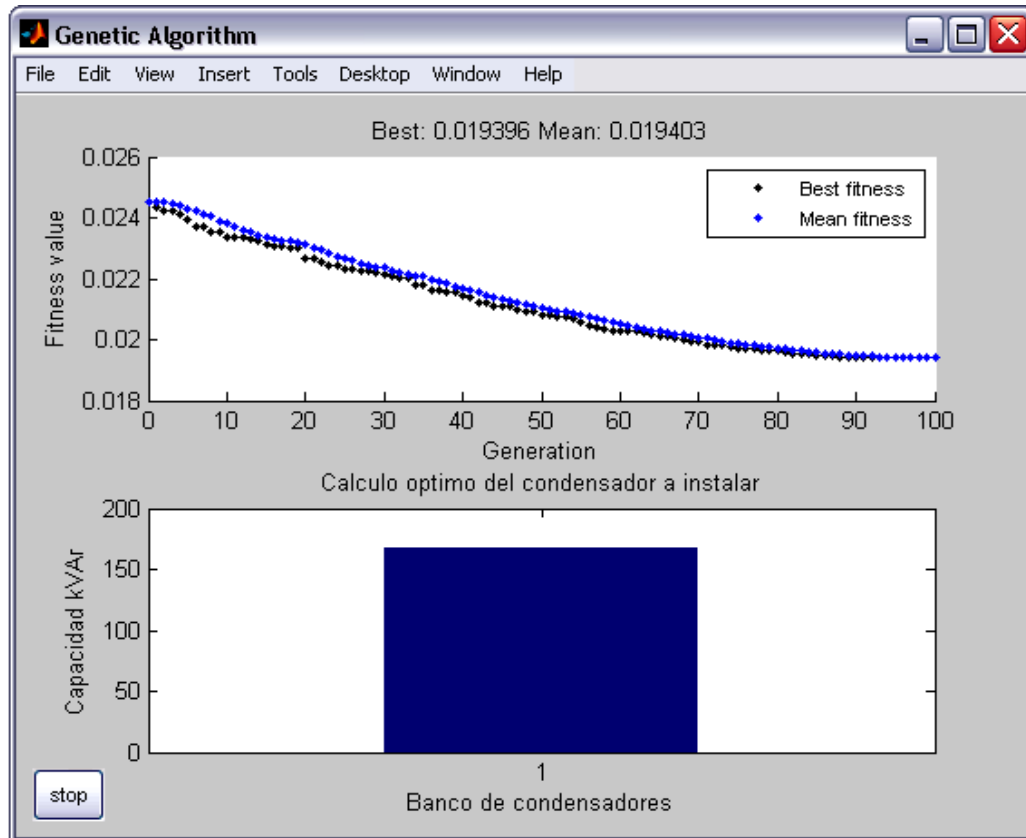


Fig.3.3: Nivel de capacidad del banco de condensadores.

El conductor empleado en todos los tramos de línea es el AGW-4. Se realizaron 5 corridas de la aplicación formulada en algoritmos genéticos en el programa MATLAB, se obtuvo que el valor óptimo del banco de capacitores a instalar en la empresa en cuestión sea de 210 kVA_r ([ver anexo 6](#)). El resultado de la compensación realizada en la aplicación se muestra en el grafico de la figura 3.3, el valor optimo es alcanzando a las 90 iteraciones. Todo lo anterior permite afirmar que con la aplicación desarrollada se pueden realizar análisis de regímenes de redes radiales y localizar bancos de condensadores en las mismas, con una gran eficiencia y calidad. Como la carga en su mayoría esta constituida por motores trifásicos los cuales representan un 98.74% de la carga total instalada, se puede considerar que la potencia reactiva por fase es la misma y como el banco a seleccionar también es trifásico, se puede plantear:

$$P_B = \frac{P_{3\phi}}{3}$$

$$P_B = \frac{170}{3}$$

$$P_B = 56.6 \text{ kVAr}$$

Al realizar un análisis detallado del problema, se pudo constatar que la mejor variante es la selección de un banco automático, con los siguientes taps de conmutación, el cual fue tomado del catalogo SUOMITEC de NOKIAN CAPACITORS:

TAPS	TAP 1	TAP 2	TAP 3	TAP 4
Capacidad (kVAr)	5	10	20	20

Tabla 3.1: Valores de capacidad de los taps del banco de condensadores.

Aunque el banco seleccionado es de 1 kVAR menor que el necesitado, el resultado es bueno, pues en caso de un pico de potencia reactiva, el factor de potencia solo variara un valor insignificante.

✓ Reducción de pérdidas.

En la mayoría de las instalaciones, las pérdidas de energía en el sistema de distribución representan entre el 2.5 – 7.5% de la energía consumida por las cargas. Esto depende de la variabilidad de las cargas, el calibre y longitud de los circuitos, etc. Los medios compensadores solo pueden reducir la parte de las pérdidas debida a la circulación de la potencia reactiva.

En los conductores

$$\Delta P_1 = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} * r \quad y \quad \Delta P_2 = \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{V^2} * r$$

$$\Delta P_1 = \frac{283^2 + 300^2}{480^2} * 1.94 \quad y \quad \Delta P_2 = \frac{283^2 + (300 - 176)^2}{480^2} * 1.94$$

$$\Delta P_1 = 1.50 \text{ kW}$$

$$\Delta P_2 = 0.803 \text{ kW}$$

El ahorro de pérdidas depende de:

$$\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1$$

Las pérdidas en un circuito son proporcionales al cuadrado de la corriente, por lo que un cambio en el factor de potencia $\cos\phi_1$ a $\cos\phi_2$ provoca una variación de las pérdidas:

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 * \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 = \Delta P_1 * \left(\frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2}\right)^2$$

Entonces, el ahorro de pérdidas es:

$$\Delta P = \Delta P_1 * \left[1 - \left(\frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2}\right)^2\right]$$

$$\Delta P = 1.43 * \left[1 - \left(\frac{0.68}{0.95}\right)^2\right]$$

$$\Delta P = 0.689kW$$

El ahorro de pérdidas en un mes se puede plantear de la forma siguiente:

$$\Delta P_{MES} = \Delta P * t$$

$$\Delta P_{MES} = 0.689kW * 720 \text{ horas}$$

$$\Delta P_{MES} = 496.08 \text{ kWh}$$

Esto demuestra que con solo mejorar el factor de potencia, se ahorrará en la empresa un promedio de medio megaWatt al mes, esto llevado a un año equivale a 6 MW ahorrados, contribuyendo al ahorro de la energía tanto de la empresa como del país.

Por transformación

Antes de la compensación las pérdidas en los transformadores se puede plantear de la siguiente forma:

$$PT = PFE * Te + (kVAr / kVAn)^2 * PCU * Te$$

Donde:

P_T : Pérdidas totales que se producen en un transformador.

P_{FE} : Pérdidas de hierro.

T_e : Tiempo equivalente de perdidas.

kVAr: Consumo del mes (kWh) / $T_1 * f_p$ = kVA reales.

P_{CU} : Pérdidas de cobre.

kVAn: kVA nominales.

El tiempo equivalente de pérdidas se calculo en el software de diseño y construcción de sistemas eléctrico “DYCSE”, al hacer la corrida de este obtuvimos un tiempo de pérdidas de 5849.59 h.

$$PT = 2.237 * 5844,59 + (412 / 750)^2 * 9.925 * 5844,59$$

$$PT = 76805.32 kW / año$$

Despues de compensar

$$PT_c = 2.237 * 5844,59 + (296.32 / 750)^2 * 9.925 * 5844,59$$

$$PT_c = 58911.15 kW / año$$

La variación de perdidas por transformación viene dada por la ecuación:

$$\Delta PT = PT - PT_c$$

$$\Delta PT = 76805.32 - 58911.15$$

$$\Delta PT = 17894.17 kW$$

En el caso general en que se conectan un conjunto de bancos de capacitores en diferentes nodos del sistema eléctrico, el ahorro en las pérdidas depende del efecto de todos los bancos y no puede separarse por cada uno de ellos. Con la aplicación desarrollada, se obtienen resultados con respecto a los métodos tradicionales de cálculo para la mejora el factor de potencia, con gran similitud. Con respecto al “DYCSE”, se obtuvieron resultados muy semejantes, con un error menor al 2.29%, el condensador calculado por este es de 174 kVAr, el gráfico de convergencia se muestra en la [Anexo 7](#)

3.4 Valoración económica del proyecto.

El factor de potencia, la eficiencia energética tienen una estrecha relación, esto se afirma porque la energía posee estrechos vínculos con la economía, las cuestiones sociales, como son la pobreza, la urbanización, el crecimiento de la

población y la falta de oportunidades para la mujer, entre otras; y por último, la protección del medio ambiente, pues no podemos olvidar las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes del consumo de combustibles fósiles causantes de los cambios climatológicos. Un eficiente sistema energético impulsa el crecimiento económico, por tanto su desarrollo constituye clave para cualquier país; sin embargo, el acceso a ella y su utilización varía entre los países ricos y pobres. Estas abismales diferencias en el consumo de la obstaculizan el desarrollo sostenible. La utilización de la energía eleva espectacularmente las oportunidades de los ciudadanos para disfrutar de un confort, movilidad y productividad nunca antes alcanzado, pero nos convierte en consumidores dependientes de los servicios energéticos; hoy prácticamente la totalidad de las actividades económicas necesitan de estos servicios, mientras que en los hogares dichos beneficios incluyen iluminación, cocción de los alimentos, refrigeración y transporte, entre otros.

En los países industriales las personas consumen cien veces más energía, en términos per cápita, que antes de que los seres humanos aprendieran a utilizar la energía del fuego; sin embargo, cerca de dos mil millones de personas, la tercera parte de la población mundial, quedan excluidos de los servicios energéticos comerciales, es decir, no existe un acceso universal a los combustibles modernos y a la electricidad, lo cual representa una falta de equidad con dimensiones morales y políticas.

Aunque es incuestionable el potencial de la energía para alcanzar el desarrollo económico y social, también lo es la repercusión que tiene en la degradación del medio ambiente, ya que la combustión de combustibles fósiles es la mayor fuente de gases tóxicos que atentan contra la salud humana, en específico, y en general contra la salud de los ecosistemas. Otra problemática que deben enfrentar los gobiernos en el tema energético es el mercado de los combustibles y su dependencia a los vaivenes de sus precios, que se comportan de forma muy volátil e inconsistente.

La demanda mundial de energía tiene actualmente la tendencia a aumentar, pronosticándose que dentro de veinte años habrá crecido cerca de dos tercios por encima de la demanda existente y aunque para los próximos 50-100 años no parece existir límites en su consumo, para el logro de un desarrollo sostenido a escala mundial se hace indispensable la búsqueda de nuevas

fuentes de energía y una mayor eficiencia en su producción y distribución, de lo contrario se acelerarán los daños en el medio ambiente, aumentará la desigualdad y no sólo el desarrollo económico mundial estará en peligro, sino también la especie humana y el planeta.

Esto significa que el diseño de cualquier estrategia de desarrollo sostenido no puede excluir la búsqueda y desarrollo de un servicio energético sostenible, o sea, una energía sostenible como resultado de una producción y consumo que fomente el bienestar humano equitativo y el equilibrio ecológico a largo plazo.

Un elemento importante para promover la sostenibilidad del servicio energético es su eficiencia. En la actualidad, a nivel mundial, la eficiencia para transformar la energía primaria en útil es aproximadamente un tercio de la energía primaria procesada, magnitud que no garantiza las actuales demandas del desarrollo sostenible.

3.4.1 Elementos de la Tarifa.

Otro aspecto a tener en cuenta, es el pago que se hace por la energía consumida en las instalaciones industriales y que esta fuertemente influenciada por la forma de la curva de consumo. Existen diferentes tarifas según las características del consumidor: solo se expondrán los aspectos fundamentales de las mismas. En 1er lugar, hay que realizar el contrato por la “máxima demanda”, que se espera se producirá en el mes. Este contrato estipula el pago de una cantidad de dinero (pesos o dólares) mensualmente por cada kW de demanda máxima contratado, es evidente que cuando mayor sea el pico eléctrico, independientemente de las afectaciones que tiene en cuanto al incremento de las perdidas como ya se ha visto, mayor será la asignación fija mensual que debe abonarse. Los metros de los grandes consumidores están equipados con metros de demanda máxima que hacen el registro de las mismas con intervalo de 15 minutos en forma acumulativa, o sea a fin de mes se conserva el valor de la máxima demanda ocurrida en el mes, si este sobrepasa la cantidad contratada, se cobra una penalización por el exceso de la demanda máxima al triple del precio establecido. Esta medida obliga a tener un pico lo más reducido posible para reducir la cantidad fija que se paga mensualmente, y lo más importante, impone la responsabilidad para no

sobrepasarlo por las aplicaciones económicas que acarrea al usuario. El otro aspecto que debe considerarse en la forma de las cargas, es el consumo de energía a diferentes horas del día.

Los grandes consumidores poseen un metro contador de 2 o 3 registros, donde se registra la energía consumida en diferentes horarios y que se facturan a diferentes precios, el cambio de registro se realiza en forma automática mediante el control que realiza un reloj que acompaña a la instalación de medición. Para el caso de consumidores de tres registros, se establece los siguientes intervalos de lecturas:

- Desde las 6 am hasta las 6pm (Día).
- Desde las 6 pm hasta las 10pm (Pico).
- Desde las 10 pm hasta las 6am (Madrugada).

Como puede observarse, esta tarifa estimula al uso de la energía en hora de la madrugada, con un menor precio, a la vez que penaliza el consumo a las horas del pico eléctrico en el sistema electroenergético nacional. El usuario que no recibe penalización durante el año al no sobrepasar la demanda máxima contratada, recibe una bonificación financiera. Por todo lo expuesto es fácil deducir que el uso racional de la energía eléctrica, evitando los antieconómicos picos, beneficia al usuario desde el punto de vista de la disminución de las pérdidas, y desde el punto de vista financiero por la reducción de la factura mensual por el pago de este portador energético, además del beneficio al sistema eléctrico.

Ecuación General de la Tarifa.

$$\text{\$} = \left\{ \left[(kWh_{Día} \cdot P_{Día} + kWh_{Pico} \cdot P_{Pico} + kWh_{Mad} \cdot P_{Mad}) + kWh_{Cont} \cdot C_{Dem} \right] \cdot \frac{0.92}{f_p} \right\} F_{cc}$$

Donde:

kWh : Consumo Mensual de Energía

P : Costo de la Energía en $\text{\$/kWh}$

kWh_{Cont} : Consumo Mensual de la Máxima Demanda Contratada

C_{Dem} : Costo de la Máxima Demanda en \$/kW al mes

F_{cc} : Factor de Corrección de Combustible.

Al hacer la corrida de la aplicación en MATLAB se obtuvo el valor del importe antes de la compensación y después de esta. El importe total pagado por la empresa antes de la compensación es de \$266700 al año, al hacer un análisis de la situación de la empresa de productos lácteos de las tunas se pudo constatar que la demanda máxima contratada esta muy por encima de los valores pico en esta empresa, por lo que se recomienda disminuir el valor de esta en el contrato con la OBE, con la reducción de esta disminuirá el importe por cargo fijo, logrando así una reducción del importe total. Se recomienda que la demanda máxima contratada sea de 350kW diario y no 455KW como esta actualmente, debido a que el pico máximo de consumo histórico es de 124.8kW, esto implica que:

Demanda contratada actualmente

$$Icf = P_{contratada} * Dc$$

$$Icf = 455 * 5$$

$$Icf = \$2275 \text{ al mes}$$

$$Icf = \$27300 \text{ al año}$$

Demanda contratada propuesta

$$Icf = P_{contratada} * Dc$$

$$Icf = 350 * 5$$

$$Icf = \$1750 \text{ al mes}$$

$$Icf = \$21000 \text{ al año}$$

esto implica que :

$$\text{ahorro } icf = 6300 \text{ al año}$$

Por otro lado, al realizar la compensación en la empresa disminuirán las perdidas de energía, la penalizaciones por bajo factor de potencia desaparecerán y en su lugar la empresa será bonificada, logrando la disminución de la factura eléctrica.

Al mejorar el factor de potencia el importe total pagado por la empresa será de \$256760 al año, ahorrando anualmente \$9940 a la empresa. Para realizar un análisis del costo de la instalación, se tendrá en cuenta además, el costo del banco a instalar, de sus accesorios así como de la mano de obra tanto para la instalación como para su mantenimiento.

El costo del banco de condensadores automático a instalar en la empresa, suministrado por NOKIAN CAPACITORS, se muestra a continuación:

No.	Descripción.	Cantidad.	Costo unitario. (cuc).	Costo Total. (cuc).
1.	Banco de Condensadores con fusibles incluidos.	1	3156.83	2014.
2.	Gabinete.	1	350.00	350.00
3.	Regulador	1	414.10	321.9
Costo total del conjunto.				2685

Tabla 3.2. Costo del banco de condensadores y el gabinete seleccionado.

Para la conexión del banco de capacitares es necesario la compra de varios accesorios, en la tabla siguiente se muestran los precios de cada uno.

No.	Descripción.	U.M.	Cant.	Costo Unitario (cuc).	Costo (cuc).
1.	Cable de cobre con recubrimiento de PVC de 3x120 + 1x70.	m	4	27	108
2.	Cinta aislante (Teype plástico).	U	10	0.87	8.7
Costo de los accesorios.					116.7

Tabla 3.3. Costos de los materiales para la instalación del banco de condensadores.

Gastos de Salario del personal de montaje:

Para evaluar los gastos relacionados con el montaje, ajuste y puesta en marcha, se estima un tiempo aproximadamente de 4 días, con la utilización de 4 trabajadores.

No.	Descripción.	Cant.	Costo diario. (cuc).	Costo total. (cuc).
1.	Técnico Superior.	1	15.21	60.20
2.	Técnico Medio.	1	11.83	47.32
3.	Electricista (Categoría B).	2	10.80	86.4
Costo de salario.				193.92

Tabla 3.4. Costos de salario para el montaje del banco de condensadores.

El cálculo de la inversión total parcial queda determinado por la expresión:

$$C_{mont} = C_{equip} + C_{acces} + C_{salario}$$

Donde:

C_{mont} = Costo del montaje.

C_{equip} = Costo total del equipamiento

C_{acces} = Costo total de los accesorios.

$C_{salario}$ = Costo total de salario.

$$C_{mont} = 2685 + 116.7 + 193.92$$

$$C_{mont} = \$2995.62$$

Gastos de reparación parcial:

Para garantizar el buen funcionamiento en la instalación de los bancos de condensadores es necesario realizar un mantenimiento preventivo, este mantenimiento debe ser planificado para un tiempo mínimo de funcionamiento de 6 meses.

El mantenimiento estándar de una instalación de este tipo requiere el cumplimiento de los siguientes requisitos:

- Realizar las pruebas de nivel de aislamiento a tierra y de alta tensión, para los niveles de voltaje recomendados por el fabricante.
- Revisar que la corriente de aire no se vea restringida dentro del gabinete.
- Remover el polvo y la tierra acumulada, así como el exceso de óxido en la superficie de los conectores.
- Limpiar la envoltura del condensador y el casquillo de aislamiento.
- Limpiar el área de contacto de los fusibles y los conjuntos portadores.

El costo de mantenimiento ha sido evaluado por el costo de salario del personal que lo realizará, así como el de los materiales necesarios para su ejecución. El mantenimiento se planifica para 4 horas de duración.

No.	Descripción.	Cant.	Costo diario. (cuc).	Costo total. (cuc).
1.	Técnico Superior, especialista en Mediciones Eléctricas.	1	15.21	2.61
2.	Electricista (Categoría B).	1	10.80	5.40
Costo de salario.				13.00

Tabla 3.5. Costos de salario para reparación parcial.

No.	Descripción.	U.M.	Cant.	Costo unitario. (cuc).	Costo total. (cuc).
1.	Cinta aislante (Teype plástico).	U	3	0.87	2.61
2.	Limpiador de contactos (Spray).	U	2	3.24	6.48
3.	Estopa.	kg.	0.25	0.0097	0.0024
Costo de los materiales.					9.09

Tabla 3.6. Costos de materiales para reparación parcial.

Los gastos por reparación parcial queda determinado por la expresión:

$$C_{rep} = C_{matr} + C_{salr}$$

$$C_{rep} = 9.09 + 13$$

$$C_{rep} = \$22.09$$

Donde:

C_{rep} = Costo de las reparaciones

C_{matr} = Costo de materiales para la reparación

C_{salr} = Costo de salario para la reparación

Inversión Total.

El costo general de la inversión para un año de explotación se determina a partir de la sumatoria de todos los gastos deducidos anteriormente, para ello se aplica la expresión.

$$I_{TOTAL} = C_{mont} + C_{rep}$$

$$I_{TOTAL} = 2995.62 + 22.09$$

$$I_{TOTAL} = \$3017.71$$

Ahorro en Pérdidas Eléctricas.

A partir de la compensación se produce una considerable disminución de las pérdidas eléctricas, para poder realizar este cálculo es necesario tener en cuenta la tarifa eléctrica de la empresa. En el caso que nos ocupa es vital que la tarifa eléctrica de la empresa sea llevada a su equivalente en cuc, ya que el banco de condensadores sólo se puede comprar en esta moneda, y poder llevar a cabo un mejor análisis del tiempo de recuperación de la inversión realizada.

En conductores

$$\Delta P_{MES} = 496.08 \text{ kWh}$$

$$\Delta P_{AÑO} = 496.08 \text{ kWh} * 12$$

$$\Delta P_{AÑO} = 5952 \text{ kWh}$$

Esto implica un importe de:

$$Ip = \Delta P_{AÑO} * 0.06$$

$$Ip = \$357.12 \Rightarrow \text{ahorro en un año por concepto de pérdidas en conductores}$$

Por transformación

$$\Delta PT = 17894.17 \text{ kW}$$

Esto implica un importe de:

$$Ipt = \Delta PT * 0.06$$

$$Ipt = \$1073.65 \Rightarrow \text{ahorro en un año por concepto de pérdidas por transformación}$$

El ahorro total en un año está dado por:

$$\text{ahorro} = Ip + Ifp + Icf + Ipt$$

$$\text{ahorro} = 357.12 + 9940 + 6300 + 1073.65$$

$$\text{ahorro} = \$17670.77 \text{ en un año}$$

Llevado a cuc

$$\text{ahorro} = \$17670.77 \text{ en un año} / 25$$

$$\text{ahorro} = \$706.83 \text{ en un año}$$

Tiempo de recuperación de la inversión.

El tiempo de recuperación de la inversión está dado por la relación entre la inversión total de la instalación y el ahorro que esta ocasiona.

$$Ta = \frac{\textit{inversion}}{\textit{ahorro}}$$

$$Ta = \frac{3017.71}{706.83}$$

$$Ta = 4.2 \text{ años}$$

Es decir, la inversión se amortiza en un periodo de 4 años y 2 meses y a partir de ese momento existirán ganancias para la empresa.

Al realizar los cálculos de los mismos aspectos económicos utilizando el software “DYCSE”, se obtuvieron los siguientes resultados:

VAN: \$11992 pesos.

TIR: 36.08 %.

Ta=4.22años.

En la figura 3.4 se muestra la aplicación en el software, con el cual se compararan los resultados de la aplicación desarrollada en MATLAB.

Resultados y Datos Generales

Total C	Total C Conec	Total F	Total F Conec	Tiempo (1 año)	Tarifa de 1 KWh	Tarifa de 1 KVAh
1	1	0	0	7655.00000 horas	0.060000 Pesos	0.040000 Pesos

Potencia P Liberada	Valor Potencia P Liberada	Total de Qc conectado	Precio de 1 cMVA	Costo Qc
0.2086 MW	95809.98 Pesos	0.170000 cMVA	Ver cada Condensador	50349.99990 Pesos

☐ Considerar la Potencia Liberada entre los Ingresos Anuales

Delta Pérdida de P	Valor Delta Pérdida de P	Valor Total de Accesorios	Costo Total de Operaciones en un Año
0.001852 MW	850.623600 Pesos	2917.5 Pesos	5522.5 Pesos

Delta Pérdida de Q	Valor Delta Pérdida de Q	Costo Total de Instalación	Costo Total de Mantenimiento en un Año
0.006483 MVA	1985.094600 Pesos	21775 Pesos	4830 Pesos

Configuración 1. Calcular Estos Datos Rojos 1. Calcular Porcentual

☒ Gastos de Depreciación D=Go/n ☒ Impuestos 5 % Préstamo Recibido (T. M. de C1 / 12) 0 Total de Meses

☒ Cálculo de Costo de Operaciones Anuales como % de Go Valor del % de Go para calcular Operaciones (incluye Mantenimiento) 15 %

Datos Específicos para el Cálculo Dinámico Económico

Número de años 5 2. Trasladar Datos de Cobros 3. Trasladar Datos de Gastos

Valores de Cobros (ganancia del usuario) y Gastos (lo que paga el usuario) por año. En cada celda escriba 0 o números reales positivos

Año	0	1	2	3	4	5
Cobro = C	0	51322.182	51322.182	51322.182	51322.182	51322.182
Pago = P	75042.4999	28362.699976	28362.699976	28362.699976	28362.699976	28362.699976
Saldo = C - P	-75042.4999	22959.482024	22959.482024	22959.482024	22959.482024	22959.482024

Interés (en %) : 10

4. Calcular Saldos en la Tabla Grabar Datos Leer Datos

Paso E para el Cálculo del TIR 0.00001

Cota Máxima del TIR (en %) 300

Paso E para el Cálculo del PeRe 0.00001

5. Cálculos Económicos

VAN 11992.00 Pesos **Gráfico del Valor Neto**

TIR 36.08 %

Período de Recuperación 4.22 Años **Salir**

Figura 3.4: cálculo del modelo económico: VAN, TIR y periodo de recuperación en el software “DYCSE”.

3.5 Conclusiones del capítulo.

- Se ha desarrollado una herramienta computacional eficaz, versátil y apropiada tanto para aplicaciones académicas como profesionales, facilitando así el análisis en sistemas eléctricos de potencia.
- Con la aplicación desarrollada se pueden realizar análisis de regímenes de redes radiales y seleccionar bancos de condensadores en las mismas, con una gran eficiencia y calidad.
- Las aplicaciones de algoritmos genéticos a problemas de sistemas de potencia son todavía incipientes, sin embargo se prevé que en los próximos años su desarrollo y difusión sean muy significativos. Se espera que el presente trabajo sea una contribución para su desarrollo y difusión en Cuba.
- La inversión se recupera en un periodo de 4 años y 2 meses.
- Al comparar los resultados obtenidos por la aplicación con los resultados obtenidos por el "DYCSE", se obtiene que el error de 0.95%, lográndose así una alta efectividad en la aplicación desarrollada.

Conclusiones Generales

En la empresa de productos lácteos de las tunas no se hace un uso racional de la energía eléctrica, debido a la ausencia de elementos compensadores.

El transformador de alimentación de la empresa está sobredimensionado, lo que ocasiona pérdidas al encontrarse operando a un 54.9 % de cargabilidad cuando está operando en el horario de demanda máxima.

La empresa tiene contratado 455 kW y ella consume realmente 324 kW en su pico histórico máximo, lo que representa un 71.2% de sobrefacturación de la energía.

El factor de potencia en los alimentadores oscila entre 0.43 y 0.68 por lo que se hace necesario la compensación de la potencia reactiva. Esto está condicionado por la presencia de motores asíncronos sobredimensionados, los cuales representan un 98.74% de la carga total instalada.

Se planteó la importancia de la adecuada asignación de potencia reactiva por su aspecto técnico y económico.

Se ha desarrollado una herramienta computacional eficaz, versátil y apropiada tanto para aplicaciones académicas como profesionales, facilitando la selección de bancos de condensadores en las mismas, con una gran eficiencia y calidad.

Las aplicaciones de algoritmos genéticos a problemas de sistemas de potencia son todavía incipientes, sin embargo se prevé que en los próximos años su desarrollo y difusión sean muy significativos. Se espera que el presente trabajo sea una contribución para su desarrollo y difusión en Cuba.

La inversión se recupera en un periodo de 4 años y 2 meses.

Al comparar los resultados obtenidos por la aplicación con los resultados obtenidos por el "DYCSE", se obtiene que el error es de 0.95%, lográndose así una alta efectividad en la aplicación desarrollada.

Las aplicaciones de algoritmos genéticos a problemas de sistemas de potencia son todavía incipientes, sin embargo se prevé que en los próximos años su desarrollo y difusión sean muy significativos.

Se espera que el presente trabajo sea una contribución para su desarrollo y difusión en Cuba.

Recomendaciones

Se recomienda realizar un posterior análisis en un circuito en configuración radial o lazo, pero que tenga varios centros de carga y que la caída de tensión en varios puntos de medición sea considerable.

Se recomienda hacer una aplicación similar a esta pero teniendo en cuenta, además de la capacidad, la localización óptima de estos.

Se recomienda la utilización de los algoritmos genéticos en la solución de problemas, y su aplicación para la solución de problemas similares.

Se recomienda realizar un estudio para aplicar un sistema total de gestión energética.

Bibliografía

ESTRADA, G. H; TOVAR, J. H. Metodología para la localización óptima de condensadores Mediante Sensibilidades Lineales. *Revista del IEEE América Latina*. [en línea]. [Consultado abril 2009]. Disponible en: <http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/vol3issue2April2005.htm>

VIEGO, P. F; ARMAS, M. A de. *Temas Especiales de Sistemas Eléctricos Industriales*. Cienfuegos: Centro de estudios de la Energía y el Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, [s.a].

ROMEY, R. A; *Aplicación de MATLAB para la compensación de potencia reactiva en redes de distribución de energía vía algoritmos genéticos: conferencia internacional FIE 2008, del Área de interés explotación y optimización de Sistemas de Energía Eléctrica de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba*.

LÓPEZ, M. J. *Las perturbaciones armónicas y los niveles de CEM en relación a la corrección del factor de potencia*. [s.l]: [s.n], [s.a].

VIEGO, P. F; Armas, M. A de. *Sistemas Eléctricos Industriales*. Universidad de Cienfuegos: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente.

CARRILLO, G; GABRIEL, C. O. *Metodología integral para la compensación de la potencia ficticia en sistemas de distribución de energía eléctrica*, Simposio Internacional sobre Calidad de Energía Eléctrica celebrado en Bogotá, Colombia.

DIEGO-MAS, J. A. *Optimización de la distribución en plantas de instalaciones industriales mediante algoritmo genético*. [en línea]. [Consultado mayo 2009]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia Disponible en: <http://www.dpi.upv.es/nueva.html>.

CBAGHZOUZ, Y; ERTEM S. Shunt Capacitor Sizing for Radial Distribution Feeder with Distorted Substation Voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1990, Vol. 5, No. 2, p. 650-657.

ANEXOS

Anexo1: levantamiento de carga de la empresa de productos lácteos de las tunas

AREA DE CALDERAS						
	P(kW)	f.pot	Denominación.	U(V)	S	Q
M1	1,3	0,84	Motor	440	1,547619	0,839717
M2	9,2	0,89	Motor	440	10,33708	4,7133
M3	3	0,9	Motor	440	3,333333	1,452966
M4	3	0,9	Motor	440	3,333333	1,452966
M5	3	0,9	Motor	440	3,333333	1,452966
M6	1,3	0,81	Motor	440	1,604938	0,941184
M7	1,3	0,81	Motor	440	1,604938	0,941184
lam 40 w	6 de 40W(0.24KW)	0,8	Lámpara	220	0,3	0,18
AREA DE REFRIGERACION						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	110	0,83	Motor	440	132,5301	73,92045
M2	110	0,83	Motor	440	132,5301	73,92045
M3	90	0,9	Motor	440	100	43,58899
M4	30	0,86	Motor	440	34,88372	17,80095
M5	30	0,86	Motor	440	34,88372	17,80095
M6	30	0,86	Motor	440	34,88372	17,80095
M7	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M8	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M9	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M10	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M11	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M12	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M13	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
lam 40 w	6 de 40W(0.24KW)	0,8	Lámpara	220	0,3	0,18
AREA DE COMPRESORES						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	35	0,84	Motor	440	41,66667	22,60777
M2	40	0,86	Motor	440	46,51163	23,73461
lam 40 w	2 de 40W(0.08KW)	0,8	Lámpara	220	0,1	0,06
AREA DE ESTERAS						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M2	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
lam 40 w	7 de 40W(0.28KW)	0,8	Lámpara	220	0,35	0,21
AREA DE QUESO						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M2	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M3	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
lam 40 w	8 de 40W(0.32KW)	0,8	Lámpara	220	0,4	0,24
AREA DE LLENAJE						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M2	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125

Compensación de potencia reactiva en el combinado lácteo de Las Tunas

M3	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M4	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M5	0,22	0,86	Motor	440	0,255814	0,13054
M6	0,22	0,86	Motor	440	0,255814	0,13054
M7	0,22	0,86	Motor	440	0,255814	0,13054
M8	0,22	0,86	Motor	440	0,255814	0,13054
lam 40 w	6 de 40W(0.24KW)	0,8	Lámpara	220	0,3	0,18
AREA DE BOMBAS						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	18,5	0,81	Motor	440	22,83951	13,39377
M2	18,5	0,81	Motor	440	22,83951	13,39377
M3	22	0,84	Motor	440	26,19048	14,2106
M4	22	0,84	Motor	440	26,19048	14,2106
lam 40 w	2 de 40W(0.08KW)	0,8	Lámpara	220	0,1	0,06
AREA DE SOYA						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M2	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M3	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M4	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M5	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M6	35	0,84	Motor	440	41,66667	22,60777
M7	35	0,84	Motor	440	41,66667	22,60777
M8	0,75	0,86	Motor	440	0,872093	0,445024
M9	0,75	0,86	Motor	440	0,872093	0,445024
M10	3,5	0,89	Motor	440	3,932584	1,793103
M11	3,5	0,89	Motor	440	3,932584	1,793103
M12	4,6	0,87	Motor	440	5,287356	2,60694
M13	4,6	0,87	Motor	440	5,287356	2,60694
M14	4,6	0,87	Motor	440	5,287356	2,60694
M15	1,2	0,81	Motor	440	1,481481	0,868785
M16	1,2	0,81	Motor	440	1,481481	0,868785
M17	1,2	0,81	Motor	440	1,481481	0,868785
M18	0,22	0,86	Motor	440	0,255814	0,13054
M19	2,7	0,76	Motor	440	3,552632	2,308937
M20	0,09	0,72	Motor	440	0,125	0,086747
M21	10	0,81	Motor	440	12,34568	7,239875
M22	1	0,81	Motor	440	1,234568	0,723988
lam 40 w	8 de 40W(0.32KW)	0,8	Lámpara	220	0,4	0,24
AREA DE MANTENIMIENTO						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	5,5	0,89	Motor	440	6,179775	2,817734
M2	10	0,89	Motor	440	11,23596	5,123152
M3	5	0,87	Motor	440	5,747126	2,833631
M4	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M5	1,3	0,81	Motor	440	1,604938	0,941184
M6	0,75	0,86	Motor	440	0,872093	0,445024
lam 40 w	4 de 40W(0.16KW)	0,8	Lámpara	440	0,2	0,12
COM 1	0,45	0,85	Computadora	220	0,529412	0,278885
Aire.Acon	0,65	0,85	Aire acondic		0,764706	0,402834
AREA DE NEVERA						

Compensación de potencia reactiva en el combinado lácteo de Las Tunas

	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M2	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M3	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M4	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
lam 40 w	5 de 40W(0.2KW)	0,8	Lámpara	220	0,25	0,15
AREA DE CHOCOLATE						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	1	0,81	Motor	440	1,234568	0,723988
M2	1	0,81	Motor	440	1,234568	0,723988
M3	0,25	0,86	Motor	440	0,290698	0,148341
M4	0,25	0,86	Motor	440	0,290698	0,148341
M5	0,25	0,86	Motor	440	0,290698	0,148341
M6	0,25	0,86	Motor	440	0,290698	0,148341
M7	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M8	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M9	0,9	0,8	Motor	440	1,125	0,675
M10	0,9	0,8	Motor	440	1,125	0,675
M11	0,18	0,81	Motor	440	0,222222	0,130318
M12	0,18	0,81	Motor	440	0,222222	0,130318
M13	10	0,81	Motor	440	12,34568	7,239875
M14	5	0,87	Motor	440	5,747126	2,833631
lam 40 w	7 de 40W(0.28KW)	0,8	Lámpara	220	0,35	0,21
AREA DE PRODUCCION						
	P(kW)	f.pot	Motor			
M1	5,5	0,87	Motor	440	6,321839	3,116994
M2	5,5	0,87	Motor	440	6,321839	3,116994
M3	5,5	0,87	Motor	440	6,321839	3,116994
M4	5,5	0,87	Motor	440	6,321839	3,116994
M5	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M6	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M7	1,5	0,8	Motor	440	1,875	1,125
M8	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M9	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M10	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M11	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M12	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M13	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M14	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M15	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M16	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M17	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M18	1,1	0,81	Motor	440	1,358025	0,796386
M19	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M20	2,2	0,72	Motor	440	3,055556	2,120476
M21	4	0,89	Motor	440	4,494382	2,049261
M22	7,5	0,86	Motor	440	8,72093	4,450239
M23	7,5	0,86	Motor	440	8,72093	4,450239
lam 40 w	10 de 40W(0.4KW)	0,8	Lámpara	220	0,5	0,3
AREA ADMINISTRATIVA						

	P(kW)					
COMP 1	0,45	0,85	Computadora	220	0,529412	0,278885
COMP 2	0,45	0,85	Computadora	220	0,529412	0,278885
COMP 3	0,45	0,85	Computadora	220	0,529412	0,278885
COMP 4	0,45	0,85	Computadora	220	0,529412	0,278885
COMP 5	0,45	0,85	Computadora	220	0,529412	0,278885
lam 40 w	6 de 40W(0.24KW)	0,8	Lámpara	220	0,3	0,18
aire.acon	6 de 650W(3,9KW)	0,85	Aire acondic.		4,588235	2,417003
Total	857,73	0,81			1021,883	550,554

[Regresar a levantamiento de carga](#)

Anexo 2: Datos de las potencias de las mediciones tomadas en el nodo central de la empresa de productos lácteos de las Tunas

Tiempo	P.Activa 3Φ	P. Inductiva 3Φ	P. Capacitiva 3Φ	F.potencia	P. Aparente 3Φ
9:30:00	248	258	0	0,69	357
9:45:00	265	259	0	0,71	372
10:00:00	263	266	0	0,7	375
10:15:00	265	272	0	0,69	380
10:30:00	251	283	0	0,66	379
10:45:00	257	275	0	0,68	376
11:00:00	266	279	0	0,69	386
11:15:00	261	281	0	0,68	384
11:30:00	259	285	0	0,67	384
11:45:00	232	268	0	0,65	355
12:00:00	211	250	0	0,64	327
12:15:00	230	261	0	0,66	348
12:30:00	255	275	0	0,68	376
12:45:00	242	262	0	0,67	356
13:00:00	194	223	0	0,65	295
13:15:00	210	215	0	0,7	300
13:30:00	217	228	0	0,69	316
13:45:00	224	232	0	0,69	323
14:00:00	235	251	0	0,68	344
14:15:00	239	261	0	0,67	355
14:30:00	214	253	0	0,64	331
14:45:00	220	260	0	0,64	341
15:00:00	231	278	0	0,64	361
15:15:00	219	261	0	0,64	341
15:30:00	219	261	0	0,64	342
15:45:00	218	264	0	0,63	341
16:00:00	216	261	0	0,63	339
16:15:00	251	292	0	0,65	384
16:30:00	252	279	0	0,67	376
16:45:00	248	279	0	0,66	372
17:00:00	270	276	0	0,7	387
17:15:00	273	270	0	0,71	383
17:30:00	256	256	0	0,7	363

Compensación de potencia reactiva en el combinado lácteo de Las Tunas

17:45:00	206	248	0	0,64	322
18:00:00	200	228	0	0,66	303
18:15:00	186	230	0	0,63	297
18:30:00	37	46	0	0,61	59
18:45:00	218	153	0	0,82	267
19:00:00	179	82	0	0,91	195
19:15:00	188	99	0	0,88	212
19:30:00	143	44	0	0,89	160
19:45:00	188	102	0	0,88	213
20:00:00	109	69	0	0,85	129
20:15:00	101	64	0	0,85	119
20:30:00	150	210	0	0,58	258
20:45:00	159	224	0	0,58	275
21:00:00	149	216	0	0,57	263
21:15:00	153	223	0	0,56	273
21:30:00	162	236	0	0,56	287
21:45:00	158	236	0	0,55	284
22:00:00	151	234	0	0,54	280
22:15:00	145	230	0	0,53	271
22:30:00	141	236	0	0,51	276
22:45:00	141	242	0	0,5	281
23:00:00	143	228	0	0,53	269
23:15:00	138	228	0	0,52	266
23:30:00	135	221	0	0,52	258
23:45:00	120	209	0	0,5	241
0:00:00	120	205	0	0,5	237
0:15:00	116	191	0	0,52	222
0:30:00	116	191	0	0,52	224
0:45:00	117	202	0	0,5	234
1:00:00	117	198	0	0,51	229
1:15:00	115	192	0	0,51	224
1:30:00	115	198	0	0,5	230
1:45:00	112	204	0	0,48	232
2:00:00	100	205	0	0,44	227
2:15:00	109	208	0	0,46	234
2:30:00	114	210	0	0,48	237
2:45:00	114	208	0	0,48	237
3:00:00	115	210	0	0,48	240
3:15:00	115	210	0	0,48	238
3:30:00	115	211	0	0,48	241
3:45:00	112	213	0	0,46	240
4:00:00	100	208	0	0,43	229
4:15:00	110	205	0	0,47	233
4:30:00	114	214	0	0,47	243
4:45:00	112	209	0	0,47	236
5:00:00	113	215	0	0,46	242
5:15:00	111	214	0	0,46	241
5:30:00	110	207	0	0,47	235
5:45:00	98	200	0	0,44	223
6:00:00	108	218	0	0,44	243
6:15:00	122	221	0	0,48	253
6:30:00	118	214	0	0,48	243
6:45:00	122	214	0	0,49	246
7:00:00	143	220	0	0,54	262

7:15:00	137	228	0	0,51	267
7:30:00	150	238	0	0,53	282
7:45:00	160	227	0	0,58	278
8:00:00	150	212	0	0,58	260
8:15:00	153	216	0	0,58	264
8:30:00	195	245	0	0,62	314
8:45:00	231	252	0	0,67	342
9:00:00	233	245	0	0,69	338
9:15:00	252	254	0	0,7	358
9:30:00	264	260	0	0,71	371
9:45:00	251	272	0	0,68	370
10:00:00	246	258	0	0,69	357
10:15:00	283	273	0	0,72	394
10:30:00	280	294	0	0,69	406
10:45:00	255	276	0	0,67	376
11:00:00	257	290	0	0,66	386
11:15:00	260	282	0	0,68	384
11:30:00	283	300	0	0,68	412
11:45:00	278	292	0	0,69	402

Regresar a gráficos de: [P. activa](#) [P.reactiva](#) [Todas las potencias](#) [Factor de potencia carga](#)

Anexo 3: Consumo de la empresa en años anteriores

Meses	Producción	MW.h(consumidos)
enero -2007	2841,50	177,0
Febrero - 2007	2219,50	70,0
Marzo -2007	884,40	170,0
Abril -2007	533,10	73,6
Mayo-2007	1124,40	151,6
junio-2007	1662,10	208,0
Julio-2007	2115,20	208,0
agosto-2007	2203,00	217,0
Septiembre-2007	2419,00	209,0
octubre-2007	2567,10	219,0
Noviembre-2007	2546,60	225,0
diciembre-2007	2122,70	178,0
Enero -2008	1714,70	166,0
Febrero-2008	1400,00	144,0
Marzo -2008	1634,70	156,0
Abril-2008	1563,40	147,0
Mayo-2008	2433,30	175,0
Junio-2008	3428,70	188,0
Julio -2008	3245,40	175,7

Agosto-2008	3503,90	186,7
Septiembre-2008	2738,50	178,7
Octubre-2008	3743,50	193,3
Noviembre-2008	3422,50	195,0
diciembre-2008	3196,70	175,6

[Regresar a grafico histórico de consumo](#)

Anexo 4: TABLA 1.4 Potencias y factor de potencia por áreas

Área	P(kW)	Q(kVA)	fp	S
calderas	7,3863	8,97	0,635668	11,61974
refrigeración	137,8493	142,8	0,694525	198,4799
compresores	24,8757	24,66	0,710179	35,02736
esteras	1,5282	1,59	0,692956	2,205333
queso	1,5848	1,8	0,660816	2,398247
llenaje	2,3489	2,31	0,712986	3,294455
bombas	26,885	28,59	0,685051	39,24527
soya	40,186	47,4	0,646676	62,14237
mantenimiento	8,1787	7,98	0,715748	11,42679
nevera	2,9715	3,75	0,621056	4,784591
chocolate	7,358	6,51	0,748946	9,824473
producción	20,6873	22,77	0,672447	30,76422
administrativa	0,8207	0,87	0,686196	1,196014
total	283	300		412,4088

[Regresar a grafico de F.P por áreas](#)

Anexo 5: Tabla de Corrección del factor de potencia

FACTOR DE POTENCIA ORIGINAL ($\cos\phi_1$)	FACTOR DE POTENCIA QUE SE DESEA ($\cos\phi_2$)										
	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90
0.65	1.169	1.027	0.966	0.919	0.877	0.840	0.806	0.774	0.743	0.714	0.685
0.66	1.138	0.996	0.935	0.888	0.847	0.810	0.775	0.743	0.712	0.683	0.654
0.67	1.108	0.966	0.905	0.857	0.816	0.779	0.745	0.713	0.682	0.652	0.624
0.68	1.078	0.936	0.875	0.828	0.787	0.750	0.715	0.683	0.652	0.623	0.594

Compensación de potencia reactiva en el combinado lácteo de Las Tunas

0.69	1. 04 9	0.9 07	0.8 46	0.7 98	0.7 57	0.7 20	0.68 6	0.654	0.6 23	0.593	0.565
0.70	1. 02 0	0.8 78	0.8 17	0.7 70	0.7 29	0.6 92	0.65 7	0.625	0.5 94	0.565	0.536
0.71	0. 99 2	0.8 49	0.7 89	0.7 41	0.7 00	0.6 63	0.62 9	0.597	0.5 66	0.536	0.508
0.72	0. 96 4	0.8 21	0.7 61	0.7 13	0.6 72	0.6 35	0.60 1	0.569	0.5 38	0.508	0.480
0.73	0. 93 6	0.7 94	0.7 33	0.6 86	0.6 45	0.6 08	0.57 3	0.541	0.5 10	0.481	0.452
0.74	0. 90 9	0.7 66	0.7 06	0.6 58	0.6 17	0.5 80	0.54 6	0.514	0.4 83	0.453	0.425
0.75	0. 88 2	0.7 39	0.6 79	0.6 31	0.5 90	0.5 53	0.51 9	0.487	0.4 56	0.426	0.398
0.76	0. 85 5	0.7 13	0.6 52	0.6 05	0.5 63	0.5 26	0.49 2	0.460	0.4 29	0.400	0.371
0.77	0. 82 9	0.6 86	0.6 26	0.5 78	0.5 37	0.5 00	0.46 6	0.433	0.4 03	0.373	0.344
0.78	0. 80 2	0.6 60	0.5 99	0.5 52	0.5 11	0.4 74	0.43 9	0.407	0.3 76	0.347	0.318
0.79	0. 77 6	0.6 34	0.5 73	0.5 25	0.4 84	0.4 47	0.41 3	0.381	0.3 50	0.320	0.292
0.80	0. 75 0	0.6 08	0.5 47	0.4 99	0.4 58	0.4 21	0.38 7	0.355	0.3 24	0.294	0.266
0.81	0. 72 4	0.5 81	0.5 21	0.4 73	0.4 32	0.3 95	0.36 1	0.329	0.2 98	0.268	0.240
0.82	0. 69 8	0.5 56	0.4 95	0.4 47	0.4 06	0.3 69	0.33 5	0.303	0.2 72	0.242	0.214
0.83	0. 67 2	0.5 30	0.4 69	0.4 21	0.3 80	0.3 43	0.30 9	0.277	0.2 46	0.216	0.188
0.84	0. 64 6	0.5 03	0.4 43	0.3 95	0.3 54	0.3 17	0.28 3	0.251	0.2 20	0.190	0.162
0.85	0. 62 0	0.4 77	0.4 17	0.3 69	0.3 28	0.2 91	0.25 7	0.225	0.1 94	0.164	0.135
0.86	0. 59 3	0.4 51	0.3 90	0.3 43	0.3 02	0.2 65	0.23 0	0.198	0.1 67	0.138	0.109
0.87	0. 56 7	0.4 24	0.3 64	0.3 16	0.2 75	0.2 38	0.20 4	0.172	0.1 41	0.111	0.082
0.88	0. 54 0	0.3 97	0.3 37	0.2 89	0.2 48	0.2 11	0.17 7	0.145	0.1 14	0.084	0.055
0.89	0. 51 2	0.3 70	0.3 09	0.2 62	0.2 21	0.1 84	0.14 9	0.117	0.0 86	0.057	0.028
0.90	0. 48 4	0.3 42	0.2 81	0.2 34	0.1 93	0.1 56	0.12 1	0.089	0.0 58	0.029	-

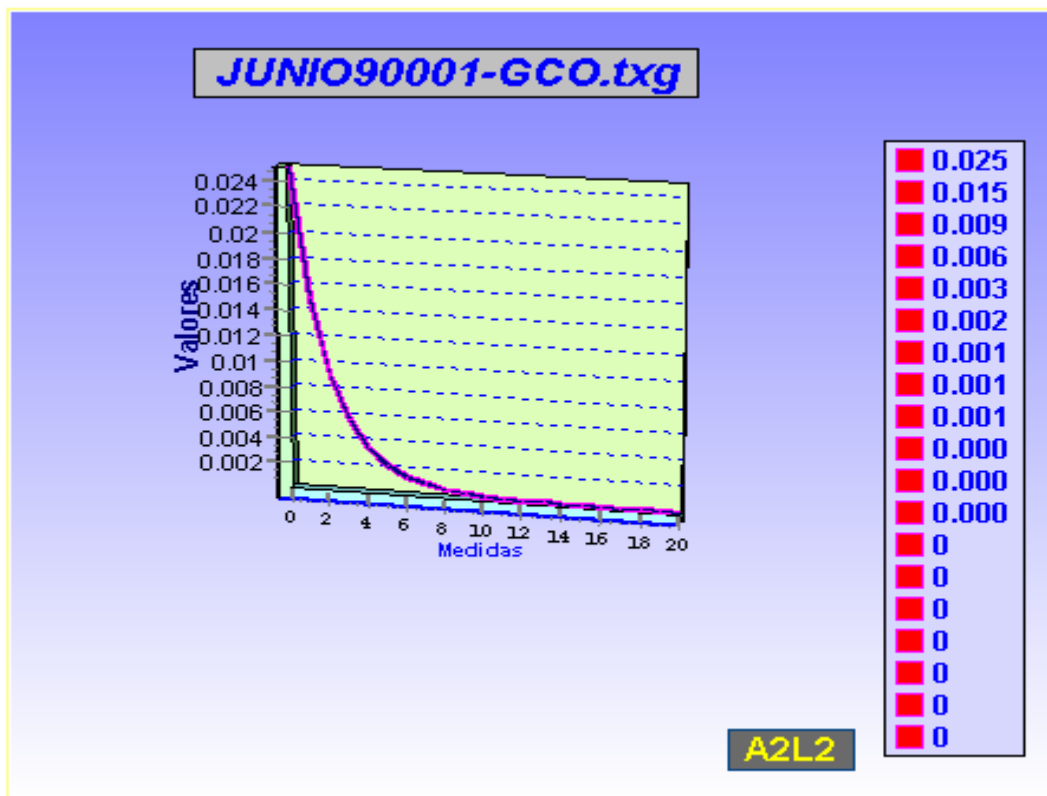
0.91	0. 45 6	0.3 13	0.2 53	0.2 05	0.1 64	0.1 27	0.09 3	0.060	0.0 30	-	-
0.92	0. 42 6	0.2 84	0.2 23	0.1 75	0.1 34	0.0 97	0.06 3	0.031	-	-	-
0.93	0. 39 5	0.2 53	0.1 92	0.1 45	0.1 04	0.0 67	0.03 2	-	-	-	-
0.94	0. 36 3	0.2 20	0.1 60	0.1 12	0.0 71	0.0 34	-	-	-	-	-
0.95	0. 32 9	0.1 86	0.1 26	0.0 78	0.0 37	-	-	-	-	-	-
0.96	0. 29 2	0.1 49	0.0 89	0.0 41	-	-	-	-	-	-	-
0.97	0. 25 1	0.1 08	0.0 48	-	-	-	-	-	-	-	-
0.98	0. 20 3	0.0 61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.99	0. 14 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[Regresar a métodos de cálculo](#)

Anexo 6: Propiedades de la corrida del algoritmo genético

PopulationSize',100	No. De corridas	kVAr
Generation' ,100	1	170.54
SelectionFcn', @selectionstochunif	2	171.72
CrossoverFcn', {ç@crossoverscattered	3	168.92
MutationFcn' , @mutationgaussian	4	169.38
	5	170.41

[Regresar a validación del modelo](#)



Anexo 7: Fig.: 1 Grafico de convergencia del sistema de suministro de la empresa de productos lácteos de las tunas

[Regresar](#)