



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ESTUDIO SOBRE LAS CAUSAS QUE PROVOCAN
INTERRUPCIONES EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA, EN UNA FÁBRICA DE PRODUCTOS PLÁSTICOS
Y SUS EFECTOS EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN**

Adolfo Escobar Yela
Asesorado por el Ing. Sergio Estuardo Porres Sam

Guatemala, septiembre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO SOBRE LAS CAUSAS QUE PROVOCAN
INTERRUPCIONES EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA, EN UNA FÁBRICA DE PRODUCTOS PLÁSTICOS
Y SUS EFECTOS EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
POR

ADOLFO ESCOBAR YELA

ASESORADO POR EL ING. SERGIO ESTURADO PORRES SAM
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Carlos Francisco Gressi López
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO SOBRE LAS CAUSAS QUE PROVOCAN INTERRUPCIONES EN EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, EN UNA FÁBRICA DE PRODUCTOS PLÁSTICOS Y SUS EFECTOS EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN,

tema que me fuera asignado por la Coordinación de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha de noviembre de 2005.

Adolfo Escobar Yela

AGRADECIMIENTO

El autor expresa su agradecimiento a las personas que, en una u otra forma, le proporcionaron su valiosa colaboración para realizar este trabajo de graduación.

ACTO QUE DEDICO A

DIOS.

MIS PADRES: Manuel Escobar Fernández
Elvira Inés Yela Leal de Escobar

MI HERMANO: Manuel Escobar Yela

MI NOVIA: Mónica Carolina Estrada Mejía

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. TRANSITORIOS ELÉCTRICOS	
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Sobrevoltajes	4
1.1.1.1 Sobrevoltajes atmosféricas	4
1.1.1.2 Sobrevoltajes de maniobra	5
1.1.1.3 Sobrevoltajes temporales	5
1.1.2 Transitorios eléctricos	6
1.1.2.1 Transitorios de voltaje	7
1.1.2.2 Transitorios de corriente	9
1.2 Origen de transitorios en una red eléctrica	10
1.2.1 Transitorios de origen interno	11
1.2.2 Transitorios de origen externo	12
2. CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA SUMINISTRADA A LA EMPRESA	
2.1 Características de la empresa	15
2.1.1 Tipo de acometida	15
2.1.2 Caracterización de la carga	17
2.1.3 Maquinaria y equipo utilizados en la empresa	18
2.1.4 Tipos de protecciones del sistema	25

2.2	Análisis de transitorios en la empresa	26
2.2.1	Antecedentes de los problemas ocasionados por interrupciones del suministro de energía eléctrica.	26
2.2.1	Medición de transitorios eléctricos	27
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y POSIBLES SOLUCIONES AL PROBLEMA	
3.1	Causas que provocan perturbaciones de energía eléctrica en la empresa	29
3.1.1	Características de la ubicación de la empresa	33
3.1.2	Maniobras efectuadas diariamente en la empresa	35
3.1.3	Características del circuito eléctrico al cual pertenece la empresa	36
3.2	Efectos provocados por transitorios eléctricos en el proceso de producción	37
3.2.1	Interrupciones del suministro eléctrico	37
3.2.2	Problemas durante el proceso de producción	38
3.2.2.1	Daños ocasionados a la maquinaria y equipo utilizado	38
3.2.2.2	Pérdida o daños al producto elaborado	39
3.3	Soluciones para contrarrestar los disturbios que afectan el sistema eléctrico de la empresa	40
3.3.1	Sistemas de arranque para el motor de inducción del compresor	41
3.3.1.1	Arrancador estrella-delta	42
3.3.1.1.1	Cálculos del funcionamiento de un arrancador estrella-delta	44
3.3.2	Sistema de suministro ininterrumpible de potencia	46
3.3.2.1	Fuentes de poder ininterrumpido (<i>UPS</i>)	46
3.3.2.1.1	Esquema de una <i>UPS</i> en línea	47
3.3.2.1.2	Cálculo del funcionamiento de una <i>UPS</i>	48

3.3.2.1.3	Desventaja de la utilización de equipos <i>UPS</i>	49
3.3.2.2	Sintetizadores magnéticos	49
3.3.2.3	Dispositivos de almacenamiento de energía por medio de superconducción magnética	50
4.	ASPECTO ECONÓMICO	
4.1	Beneficios de la inversión en un sistema de protección contra disturbios eléctricos	53
4.1.1	Tiempos muertos debidos a problemas en el suministro de energía y costos por pérdidas de material	54
4.1.2	Costo de equipos dañados por disturbios eléctricos	57
4.1.3	Costo del equipo de protección contra disturbios eléctricos	59
4.1.4	Ventaja económica de la adquisición de un sistema de protección para el área de extrusión	62
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA	69
	APÉNDICE	71
	ANEXO 1	75
	ANEXO 2	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Fluctuaciones de voltaje y corriente, según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (<i>IEEE</i>)	1
2	Sobrevoltaje transitorio	7
3	Descargas atmosféricas	13
4	Transitorios de origen externo	13
5	Acometida de la empresa	16
6	Conexión delta-estrella del banco de transformadores de 300kVA	17
7	Corte de extrusor monohusillo	20
8	Línea de extrusión de película tubular	22
9	Sistema de sellado transversal	23
10	Sistema de fabricación de bolsas selladas lateralmente a partir de película plana.	24
11	Sistema de fabricación de bolsas selladas lateralmente a partir de una película tubular	25
12	Gráfica voltaje vrs. tiempo	28
13	Grafica del transitorio eléctrico en su etapa inicial	30
14	Gráfica del transitorio eléctrico al momento del reestablecimiento de la energía	31
15	Gráfica de potencia activa y reactiva vrs. tiempo	34
16	Niveles de protección contra sags de voltaje	40
17	Torque y corriente durante un arranque estrella-delta	43
18	Conexión de los contactores en una conexión estrella-delta	44

21	Esquema de una fuente de poder ininterrumpido en línea	47
22	Diagrama de bloques de un sintetizador magnético	50
23	Diagrama de un dispositivo de almacenamiento por superconducción	51

TABLAS

I	Categorías y características de fenómenos electromagnéticos de un sistema de potencia	3
II	Valores rms de voltaje y corriente al momento de la falla	30
III	Valores rms de los voltajes y corrientes después de la falla	32
IV	Tiempo estimado para volver a poner en funcionamiento una máquina de extrusión de plásticos	55
V	Precios de variadores de frecuencia desde 1 hp hasta 10 hp	58
VI	Precios de las <i>UPS</i> monofásicas para voltajes de 240V	59
VII	Costos totales de pérdidas en un período de 5 años sin un sistema de <i>UPS</i>	62
VIII	Costos totales de pérdidas en un período de 5 años, con un sistema de <i>UPS</i> para los controladores electrónicos	63
IX	Costos totales de pérdidas en un período de 5 años, con un sistema para la protección total del área de extrusión	63
X	Datos consolidados de las tres últimas tablas precedentes	64
XI	Datos básicos para calcular el VPNI	72
XII	Categorías y niveles de explosión de supresores de transitorios	78

LISTA DE SÍMBOLOS

μs	Microsegundo. Unidad de medida de tiempo equivalente a una millonésima de segundo.
AC	Corriente alterna.
DC	Corriente directa.
HID	<i>High intensity discharge</i> . Sistema utilizado en alumbrado para conservación de la energía.
Hz	Hertz. Unidad de medida de frecuencia eléctrica.
kHz	KiloHertz. Unidad de medida de frecuencia eléctrica equivalente a mil Hertz.
kV	Kilovoltio. Unidad de medida de la tensión eléctrica en el Sistema Internacional.
kVA	Kilovoltio-amperio. Unidad de medida de potencia eléctrica aparente.
kVAR	Kilovoltio-amperio reactivo. Unidad de medida de potencia eléctrica reactiva.
kW	Kilovatio. Unidad de medida de potencia eléctrica real.

MHz	MegaHertz. Unidad de medida de frecuencia eléctrica equivalente a un millón de Hertz.
min	Minuto. Unidad de medida de tiempo.
ms	Milisegundo. Unidad de medida de tiempo equivalente a una milésima de segundo.
ns	Nanosegundo. Unidad de medida de tiempo equivalente a mil millonésimas de segundo.
pu	Valor por unidad de una cantidad definido como la razón de la cantidad a su valor base.
Q.	Quetzal. Moneda oficial de la República de Guatemala.
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo. Unidad de medida de tiempo.
US\$	Dólar estadounidense.
V	Voltio. Unidad de medida de la tensión eléctrica.
W	Vatio. Unidad de medida de potencia eléctrica real.

GLOSARIO

Acometida	Conjunto de conductores y componentes utilizados para transportar energía eléctrica, desde las líneas de distribución de la Empresa Eléctrica de Guatemala S.A., a la instalación eléctrica del inmueble servido.
Extrusión	Proceso por el cual se obliga a una sustancia, especialmente un metal o termoplástico, a pasar por un troquel, creando de esta manera distintas formas de sección uniforme que se utilizan tanto en la industria como en la construcción y fabricación de diferentes tipos de utensilios y aparatos.
Husillo	Tornillo que utilizan las extrusoras para transportar el material fundido a la salida de la máquina.
Ferroresonancia	Cambio de signo del desfase entre las armónicas fundamentales de la tensión y la corriente (inductivo a capacitivo) cuando varía la tensión de la fuente de alimentación. Esta inversión de fase es acompañada por un gran cambio en la intensidad de la corriente ante un pequeño cambio en el valor de la tensión aplicada.

Película tubular	Material plástico de forma laminar con espesores muy delgados
PLC	<i>Programmable logic controller.</i> Equipo lógico programable utilizado para controlar, en tiempo real y en ambiente de tipo industrial, procesos secuenciales.
Recloser	Interruptor con sistema de cierre automático, una vez haya sido abierto por una falla momentánea.
Sag de voltaje	Reducción súbita de voltaje entre 10 y 90% de su valor nominal, cuya duración es de aproximadamente 0.5 ciclos hasta varios segundos.
Swell de voltaje	Incremento súbito de voltaje que generalmente acompaña a los sags de voltaje.
UPS	<i>Uninterruptable power supply.</i> Es un dispositivo o equipo capaz de suministrar energía cuando ocurre una falla que interrumpe el suministro normal de la misma.

RESUMEN

En una empresa donde el proceso de producción es continuo, uno de los problemas más críticos son las constantes interrupciones en el suministro de energía eléctrica, debido a disturbios generados tanto interna como externamente. Los microcortes de energía provocan pérdidas considerables de materiales y equipos electrónicos sensibles.

Con el análisis realizado sobre la calidad de energía eléctrica que es suministrada a la empresa Aristoplast pudo determinarse que las fallas en el sistema son principalmente de origen externo, provocadas por cortocircuitos en las líneas de distribución que interrumpen, de esa manera, el suministro de energía. Este problema puede solucionarse instalando fuentes de energía ininterrumpible que mantengan energizados los sistemas de control de la maquinaria durante el tiempo que dure la falla en el sistema. De esta manera, se evita la desprogramación de los controladores y se agiliza la puesta en marcha de las máquinas para seguir produciendo. Además, puede considerarse colocar un sistema de arranque para los motores de inducción que pueden provocar reducciones de voltaje en el sistema, ya que el arranque de los mismos produce picos de corriente muy altos.

En el capítulo 4, Aspecto económico, se hace una comparación de costos de inversión y costos de pérdidas de materiales y equipo. Puede verse que una inversión en un sistema de protección para los controladores de la maquinaria logra recuperarse en un período no mayor a cinco años, lo cual lo hace la solución más factible para reducir los costos de pérdidas debido a fallas en el suministro de energía eléctrica.

OBJETIVOS

- **General**

Realizar un análisis de las causas que provocan perturbaciones en el suministro de energía eléctrica; y presentar las posibles soluciones para contrarrestar los mismos, minimizando las pérdidas económicas para la empresa.

- **Específicos**

1. Proporcionar una breve descripción acerca de los diferentes disturbios eléctricos, sus posibles causas y efectos a la red de distribución de energía eléctrica.
2. Analizar el sistema eléctrico de la empresa para poder definir las posibles causas que provoquen perturbaciones de energía eléctrica.
3. Especificar los equipos más adecuados para proteger las instalaciones de la empresa de los disturbios eléctricos que producen fallas en los sistemas.
4. Realizar un análisis económico que demuestre los beneficios de instalar un sistema de protección contra perturbaciones eléctricas y mostrar la factibilidad de recuperar la inversión.

INTRODUCCIÓN

El análisis de sistemas eléctrico para plantas industriales consiste en las técnicas empleadas para mejorar el rendimiento del sistema de alimentación existente, y de esta manera lograr seguridad, confiabilidad, energía uniforme, continuidad del servicio, costos iniciales y ahorro de energía.

Los transitorios eléctricos son aumentos o reducciones temporales de voltaje y/o corriente que se generan en el momento en que un circuito eléctrico ha sido perturbado. Su duración puede ser desde unos milisegundos hasta varios nanosegundos, y se encuentran en todos los tipos de sistemas eléctricos, circuitos de comunicaciones y de datos. La posibilidad de que un transitorio cause interrupción o daño en dichos sistemas y circuitos depende de la energía contenida en él, y ésta es una función del voltaje y corriente sobre un período de tiempo.

El daño causado por microcortes de energía o picos de voltaje es una de las principales causas de falla en equipo eléctrico y electrónico en la actualidad. Los equipos electrónicos actuales que funcionan en su mayoría con base en microprocesadores, son radicalmente diferentes a los que se conocían hace apenas algunos años. Sin duda han aumentado su capacidad, pero se han vuelto peligrosamente vulnerables a los transitorios eléctricos, con lo cual surge la necesidad de proteger las instalaciones con equipo especialmente diseñado para tal propósito.

En una empresa industrial es importante evitar este tipo de fallas en el sistema, ya que pueden llegar a representar una pérdida para la misma, debido a que, no sólo provocan paros en la producción, sino que ocasionan gastos imprevistos por daños a los equipos y sistemas que se utilizan. En el presente trabajo se realizará un análisis de los disturbios eléctricos que afectan a una empresa de productos plásticos para conocer los problemas que ocasionan durante la producción, por qué se producen, con qué frecuencia ocurren y dar la solución más viable para contrarrestar dichos problemas.

En el análisis se investigarán las causas por las que se generan los transitorios, tanto externos como internos, ya que las perturbaciones se pueden dar por el arranque de maquinaria o por una sobrecarga al sistema de distribución por parte de la red de energía eléctrica, y pueden llegar a causar paros considerables en las líneas de producción o daños a la maquinaria que se tiene en la empresa. Además, se incluirá una evaluación del costo que puede tener el equipo de protección adecuado contra las pérdidas de producción que se dan debido a perturbaciones en el sistema eléctrico, considerando un tiempo relativamente corto para recuperar la inversión.

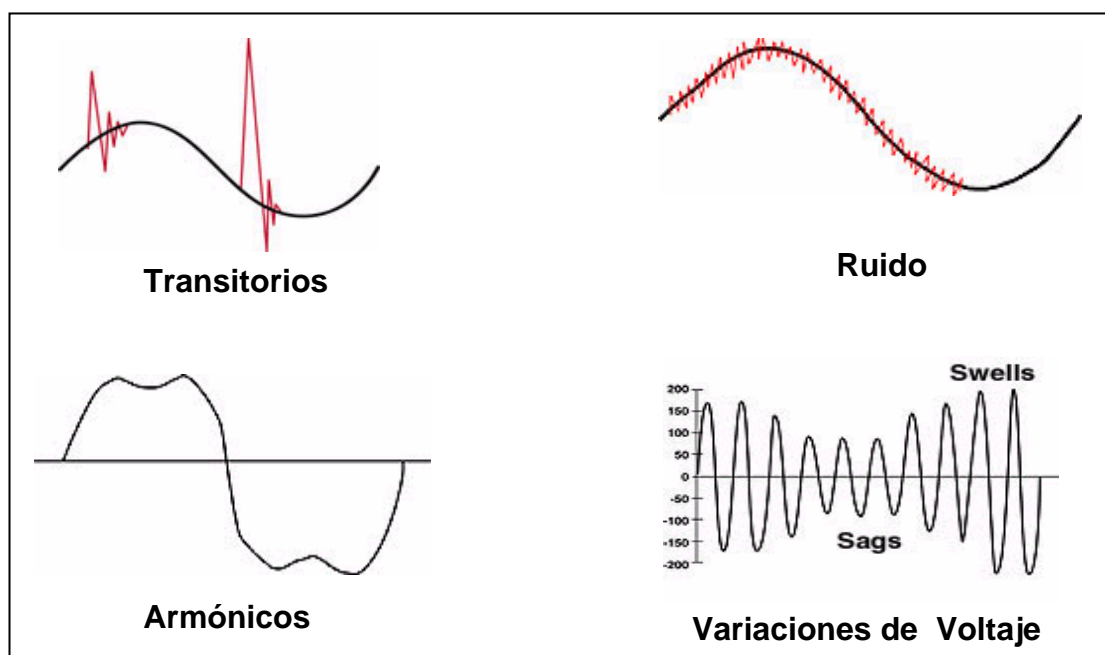
1. TRANSITORIOS ELÉCTRICOS

1.1 Generalidades

La energía eléctrica que alimenta a una empresa puede verse afectada por disturbios eléctricos que se generan por diferentes causas. Entre ellos podemos mencionar los transitorios de corriente y voltaje, armónicos eléctricos, ruidos y variaciones de voltajes (*sags*, *swells*).

Estos disturbios afectan el voltaje suministrado por la Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A. (en adelante EEGSA) de la forma como puede observarse en la figura 1.

Figura 1. **Fluctuaciones de voltaje y corriente, según el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)**



Fuente: Hubbell wiring devices. **Power quality.** Pág. 3

En una empresa industrial, las fallas son ocasionadas, en su mayoría, por fenómenos transitorios de voltaje provocados por agentes externos a la misma. Los agentes externos, como ramas de árboles, descargas atmosféricas, etc., no producen transitorios de corriente debido a que la corriente es generada por el consumidor. Estos disturbios afectan la calidad de energía de dos formas, a saber: ocasionando problemas de operación de los equipos que se encuentran en una instalación determinada y dañando los componentes que conforman la instalación eléctrica.

Los problemas de operación de equipos pueden ir desde un desarreglo en la operación programada de computadoras y de equipos controlados por microprocesadores hasta la desactivación de los arrancadores de motores. Los daños a componentes pueden ocurrir por los impulsos de rayos.

Otro avance tecnológico que hace de la calidad de energía eléctrica una preocupación, es la introducción de los sistemas de alumbrado con descarga de alta intensidad (HID) para conservación de la energía. Las lámparas de vapor de sodio de alta presión requieren de varios minutos para volver a encender después de una interrupción momentánea de voltaje. Ésta puede ser un riesgo para la seguridad, aun cuando las lámparas HID tengan una capacidad de restablecimiento rápido. La edición de 1987 del Código Nacional de Electricidad (*NEC*, por sus siglas en inglés *Nacional Eléctrica Code*) en su artículo 700-16, reconoce este problema.

Los problemas de la calidad de la energía eléctrica también pueden afectar los procesos industriales, tales como la extrusión de plásticos u otros procesos continuos. Un paro temporal de la maquinaria de extrusión de plásticos puede dar como resultado el endurecimiento del plástico y el bloqueo de los extrusores. La limpieza de la maquinaria, que debe realizarse antes de volver a ponerla en marcha, es una labor extremadamente intensa y costosa.

En la tabla I se muestran las categorías de los transitorios y variaciones de corta duración que pueden afectar el sistema eléctrico de una industria.

Tabla I. **Categorías y características de fenómenos electromagnéticos de un sistema de potencia**

Categorías		Contenido típico del espectro	Duración típica	Magnitud típica de voltaje	
Transitorios	Impulsivos	Nanosegundos	5-ns arriba	< 50 ns	
		Microsegundos	1- μ s arriba	50 ns - 1 ms	
		Milisegundos	0.1-ms arriba	> 1 ms	
	Oscilatorios	Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
		Media frecuencia	5-500 kHz	20 μ s	0-8 pu
		Alta frecuencia	0.5-5 MHz	5 μ s	0-4 pu
Variaciones de corta duración	Instantáneo	Interrupción		0.5-30 ciclos	< 0.1 pu
		<i>Sag</i>		0.5-30 ciclos	0.1-0.9 pu
		<i>Swell</i>		0.5-30 ciclos	1.1-1.8 pu
	Momentáneo	Interrupción		30 ciclos-3 s	< 0.1 pu
		<i>Sag</i>		30 ciclos-3 s	0.1-0.9 pu
		<i>Swell</i>		30 ciclos-3 s	1.1-1.4 pu
	Temporal	Interrupción		3 s-1 min	< 0.1 pu
		<i>Sag</i>		3 s-1 min	0.1-0.9 pu
		<i>Swell</i>		3 s-1 min	1.1-1.2 pu

Fuente: Roger C. Dugan. **Electrical power system quality. Pág. 12**

1.1.1 Sobrevoltajes

En los sistemas eléctricos se producen sobrevoltajes por distintas causas y pueden producir colapsos en los aislamientos y, como consecuencia, daños y/o pérdida del servicio.

Los sobrevoltajes se denominan como voltajes, en función del tiempo, que sobrepasan el valor de cresta del voltaje más elevado, que pueden ocurrir normalmente. Las ondas de sobrevoltaje, llamadas ondas viajeras, se reflejan y refractan en los puntos de discontinuidad de la impedancia de las líneas variando su forma.

Los sobrevoltajes pueden clasificarse, debido a su origen, en dos grandes grupos: sobrevoltajes externos y sobrevoltajes internos. Esta clasificación es meramente académica y no tiene intereses relacionados con la especificación de los equipos, por lo tanto resulta más apropiada otra clasificación que toma en cuenta el tiempo de duración y el grado de amortiguamiento de los sobrevoltajes. Si se toma como base esta especificación, se tiene sobrevoltajes de tipo atmosférico, de tipo maniobra y sobrevoltajes temporarias.

1.1.1.1 Sobrevoltajes atmosféricos

Este tipo de sobrevoltaje se caracteriza por un frente de onda de algunos microsegundos hasta pocas decenas de microsegundos. Un sobrevoltaje de cualquier otro origen, que tenga características de frente de onda similares a las utilizadas para definir los sobrevoltajes atmosféricos, también se clasifican como tales. Estos sobrevoltajes, además de ser de duración y amplitud muy cortas, pueden ser varias veces el voltaje del pico nominal.

1.1.1.2 Sobrevoltajes de maniobra

Un sobrevoltaje de este tipo es fuertemente amortiguado, de corta duración y puede presentar un rango de frecuencia que varía entre 2 y 10 Hz. Su origen puede estar en una maniobra de conexión o desconexión; sin embargo, puede haber otras causas que den lugar a este tipo de sobrevoltajes, como por ejemplo un cortocircuito, energización de un transformador, energización y reconexión de líneas de transmisión, ocurrencia de fallas con desplazamiento al neutro y eliminación de fallas y reconexiones de cargas.

Este tipo de sobrevoltajes son apreciables en redes de alto voltaje, por ejemplo redes de transmisión y transformación. Por el contrario, en redes de distribución de media y baja tensión, este tipo de disturbios son despreciables.

1.1.1.3 Sobrevoltajes temporales

Dentro de este grupo se encuentran los sobrevoltajes de larga duración (milisegundos) poco amortiguadas y de frecuencia igual o próxima a la frecuencia de operación. Entre los ejemplos de este tipo de sobrevoltajes puede mencionarse los cortocircuitos que suceden entre una fase y tierra o problemas de ferresonancia.

No existe una frontera muy clara entre un tipo de sobrevoltaje y otro. Por ejemplo, un cortocircuito es de tipo temporal, pero transitoriamente puede ser clasificado como de tipo maniobra. Por otra parte, la severidad que puede alcanzar cualquier transitorio depende del tipo y, sobre todo, del nivel de voltaje de la red; en redes de distribución de menos de 400 kV de voltaje nominal los sobrevoltajes producidos por un rayo son más peligrosos que los debidos a otra causa, mientras que por encima de 400 kV los sobrevoltajes de maniobra suelen ser más peligrosos.

Las tres categorías de sobrevoltajes explicadas son, generalmente, objeto de estudio para la determinación de las solicitaciones de equipos que formarán parte del sistema eléctrico de una empresa.

Las variaciones de voltaje más frecuentes son los llamados *sags* y *swells* de voltaje. Los *sags* son una reducción súbita (entre 10 y 90%) del voltaje nominal en un punto del sistema y que dura desde 0.5 ciclos hasta varios segundos. Pueden ser causadas por operaciones de maniobra asociadas con la desconexión temporal de suministro, así como con la gran demanda de corriente asociada al arranque de motores grandes o al flujo de corrientes de falla. Estos *sags* pueden emanar de los sistemas de los clientes o de la compañía suministradora. Los *swells* son incrementos en el voltaje que generalmente acompañan a las caídas de voltaje breves (*sags*). Aparecen en las fases no falladas de un circuito trifásico que ha presentado un corto circuito monofásico, así como cuando los sistemas rechazan la carga.

Los incrementos en el voltaje también pueden ocasionar trastornos en los controles y controladores de estado sólido de motores, particularmente en variadores de velocidad, los cuales pueden interrumpir su operación al accionarse la protección de sus circuitos electrónicos. Igualmente pueden someter a esfuerzos dieléctricos a los componentes de computadoras y acortar su vida útil.

1.1.2 Transitorios eléctricos

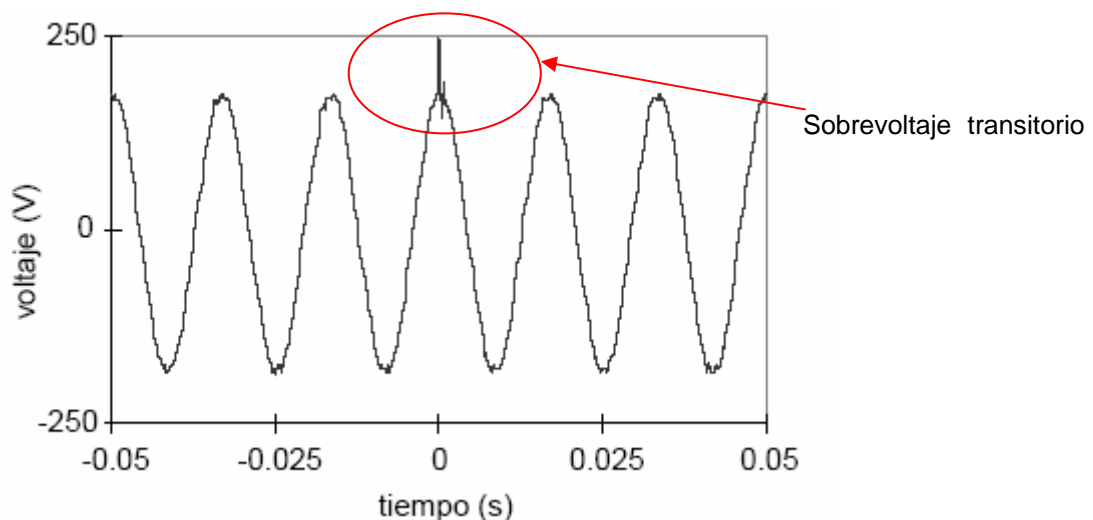
A los disturbios mucho más rápidos que los decrementos (*sags*) e incrementos (*swells*) se les llama *transitorios eléctricos*. Los fenómenos transitorios se producen cada vez que un circuito eléctrico se conmuta de una condición a otra, ya sea por medio de cambios en la fuente aplicada o por un cambio en los elementos que conforman el circuito.

Un transitorio puede tener una duración típica de milésimos de segundo (milisegundos) hasta los mil millonésimos de segundos (nanosegundos) y ocurren en todo tipo de sistemas eléctricos, de datos, circuitos de comunicaciones y señales de instrumentación.

1.1.2.1 Transitorios de voltaje

En la figura 2 puede observarse un ejemplo de un sobrevoltaje transitorio que ocurrió al conectar un capacitor a un tomacorriente. Al conectar el capacitor se produce un disturbio en la onda senoidal, ya que el voltaje aumenta su valor en un porcentaje considerable y luego este pico, generado por el cambio que sufre el sistema, se atenúa gradualmente hasta que la onda senoidal de voltaje regresa a su estado de equilibrio; como se mencionó, esto ocurre durante un período de tiempo muy corto.

Figura 2. **Sobrevoltaje transitorio**



Fuente: Allan Greenwood, **Electrical transient in power systems. Pág. 1**

Un transitorio eléctrico puede ser positivo o negativo. Si la señal es removida (señal AC) la forma de onda remanente es la componente pura del transitorio.

Los transitorios pueden ser impulsivos u oscilatorios. El transitorio es clasificado en la categoría de impulsivo cuando el 77% del voltaje pico a pico de la componente pura es de una sola polaridad; de lo contrario, es oscilatorio.

Esto quiere decir que si ocurre un transitorio y el voltaje regresa a su valor total, es impulsivo; si, por otro lado, el transitorio rebota y se va haciendo más pequeño en cada rebote, se dice que es un transitorio oscilatorio porque resuena u oscila.

En los equipos electrónicos se presentan diferentes problemas cuando ocurren transitorios eléctricos. Primero es un trastorno en el equipo que puede desplegar datos erróneos en la pantalla o bloquear el sistema, es decir que se producen perturbaciones que afectan el funcionamiento del equipo. Esto, generalmente, no causa problemas en el sistema. Sin embargo, si los transitorios ocurren con frecuencia (que los picos de voltaje, por ejemplo, sucedan todo el tiempo) pueden llegar a dañar el rectificador de la fuente o los circuitos integrados de los equipos, así como otros componentes de los mismos. Este deterioro no ocurre necesariamente en el momento en que ocurre la primera actividad transitoria; el equipo puede presentar daños un día, una semana o varios meses después. Finalmente, los fenómenos transitorios pueden causar la destrucción de los componentes de equipos electrónicos.

En los equipos de distribución (transformadores, cortacircuitos, fusibles, etc.) los picos transitorios pueden provocar los mismos efectos que en los equipos electrónicos, es decir perturbaciones, degradación o destrucción. Un pico transitorio puede generar un arco eléctrico que puede llegar a interrumpir momentáneamente la energía.

Si los transitorios ocurren con mucha frecuencia en un sistema de distribución, puede haber problemas con el cableado, fusibles, cortacircuitos, transformadores, devanados y conexiones, los cuales van degradándose por sobrecarga. Si el pico transitorio es demasiado largo, puede causar una falla en parte del sistema, concentrándose el problema en los devanados de los transformadores.

Los motores eléctricos que se tiene en la industria también son afectados de diferentes maneras por transitorios eléctricos. Si esos motores son controlados electrónicamente, entonces son susceptibles a los picos transitorios o impulsos eléctricos. Además, para los motores estándares, el problema se concentra en los devanados de los mismos. Los devanados del estator absorben energía cada vez que son afectados por picos transitorios y dependiendo de cuanta energía exista, el aislamiento de los devanados se va desgastando o fallan completamente. Cuando el aislamiento falla, el motor por sí mismo se pondrá en cortocircuito o se quemará.

1.1.2.2 Transitorios de corriente

Los transitorios de corriente, al igual que los de voltaje, son picos que se elevan muy por encima del valor nominal de la misma. Estos transitorios pueden hacerse notar cuando se miden las corrientes de arranque de un motor eléctrico debido a que, al arrancar, la corriente es varias veces la corriente nominal del motor. Esta elevación de corriente ocurre durante la aceleración del motor desde el reposo hasta su velocidad nominal.

Los transitorios de corriente se forman por dos componentes: la corriente de irrupción y la corriente de rotor bloqueado.

La corriente de irrupción es la necesaria, cada vez que se aplica un voltaje a una máquina, para generar un campo magnético en el núcleo de hierro de la misma.

El pico de la corriente de irrupción puede llegar a ser hasta 20 veces su valor nominal; sin embargo, su valor será diferente cada vez que se energice el equipo debido al magnetismo residual que queda en el núcleo. Otra característica de la corriente de irrupción es que su valor pico decae rápidamente y es totalmente independiente de la carga que se le coloque a la máquina.

La corriente de rotor bloqueado es el obstáculo que normalmente impide un arranque satisfactorio del motor sin causar efectos adversos en la potencia del sistema, ya que en el instante de arranque no existe ningún flujo magnético que se oponga al paso de corriente en los devanados del motor. Esto es lo que provoca la disminución en la aceleración de arranque del mismo.

1.2 Origen de los transitorios en una red eléctrica

En una red de energía eléctrica pueden ocurrir picos transitorios tanto interna como externamente, y el entorno eléctrico industrial se caracteriza por generar gran cantidad de disturbios y transitorios debido a la operación de máquinas de gran potencia y a la constante apertura y cierre de circuitos eléctricos, lo que provoca picos transitorios de gran amplitud y niveles de ruido elevados. Estos picos pueden producir, como se ha dicho, desde desprogramaciones de los procesos industriales debido a fallos en los PLC o cualquier otro control electrónico, hasta provocar que los semiconductores se rompan por fatiga.

Estudios han demostrado que la mayoría de los disturbios ocasionados por transitorios eléctricos (aproximadamente el 80 %) son ocasionados en el interior de las instalaciones y esto puede deberse a una carga inestable en la instalación; esto quiere decir que la carga puede cambiar durante el tiempo de labores, aumentándose o disminuyéndose.

Sin embargo, los disturbios pueden ser ocasionados por factores externos, los cuales pueden ser atmosféricos o el tipo de industria que se encuentre en los alrededores que, si bien no afectan sus instalaciones, pueden provocar trastornos a la red de distribución de energía eléctrica del sector.

1.2.1 Transitorios de origen interno

Este tipo de transitorios son los originados por maniobras dentro de las instalaciones industriales. Estas maniobras, generalmente realizadas por medio de interruptores, se ejecutan porque el sistema debe pasar de un estado a otro. Cuando se conmuta un interruptor, el voltaje en sus terminales cambia demasiado rápido de su valor nominal a cero y viceversa, provocando variaciones elevadas y bruscas de voltaje que son conducidas a través de los cables.

El entorno eléctrico industrial se caracteriza por generar un alto nivel de disturbios y transitorios, debido a la operación de maquinaria de gran potencia y al constante cierre y apertura de circuitos eléctricos, lo que, como se mencionó, provoca picos transitorios de gran amplitud y niveles de ruido elevados.

Un ejemplo de maniobras con interruptores es cuando se conectan capacitores al sistema y esto provoca sobrevoltajes transitorios. También cuando se energizan transformadores y/o motores, el cambio repentino de estado del sistema eléctrico de las instalaciones puede dar lugar a sobrecorrientes transitorias, y la desconexión de estas cargas inductivas puede ocasionar sobrevoltajes.

Entre otras causas internas que provocan transitorios eléctricos en la industria puede mencionarse los controles de velocidad variable, los interruptores de transferencias automáticas, aire acondicionado, ventilación y calefacción.

1.2.2 Transitorios de origen externo

Los picos transitorios también pueden ser generados por factores externos como, por ejemplo, las descargas atmosféricas, el viento, equipo de corrección de factor de potencia, accidentes, etc. Un rayo o descarga eléctrica puede crear intensidades de campo eléctrico de centenares o millares de voltios por metro. Por ejemplo, si dos metros de cable de conducción son expuestos a una intensidad de campo eléctrico de 300 V por metro, el cable será sometido a un voltaje transitorio inducido de 600 V. Si este transitorio de 600 V aparece a través de un cable de energía desprotegido, de teléfono, de datos o de una línea coaxial, el resultado podría ser la destrucción del sistema.

Una causa importante de transitorios son los falsos cortocircuitos. Estos son fallas provocadas por árboles o maleza, animales, pájaros o suciedad en los aisladores (debido a regiones con polvo o cerca del mar, en las cuales, al caer lluvia, puede producirse pequeños arcos eléctricos que flamean los aisladores). Dichas fallas temporales hacen accionar los interruptores de recierre de EEGSA para liberarlas del sistema de distribución.

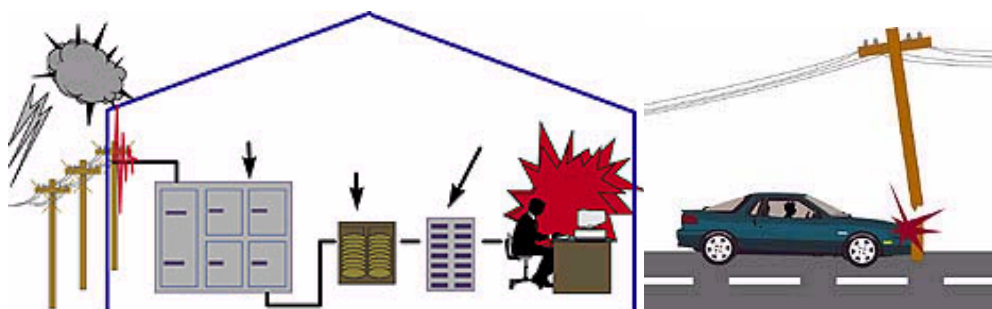
Figura 3. **Descargas atmosféricas**



Fuente: Hubbell wiring devices. **Power quality. Pág. 18**

En la figura 4 puede verse que accidentes, como cuando se produce una descarga eléctrica que cae en la línea de distribución o cuando un carro choca contra un poste de luz, pueden causar transitorios de voltaje que llegan a dañar los equipos utilizados en una empresa industrial.

Figura 4. **Transitorios de origen externo**



Fuente: Hubbell wiring devices. **Power quality. Pág. 10**

Incluso los acontecimientos considerados menores, como una ardilla que explora un transformador de energía, pueden ser causa de disturbios transitorios e interrupciones eléctricas significativas. Las ramas de los árboles o inclusive una cometa que, por acción del viento, chocan contra las líneas de distribución producen transitorios que interrumpen la distribución de energía a las industrias y residencias.

Otro factor que debe tomarse en cuenta para determinar el origen de fenómenos transitorios es el área donde se encuentra ubicada la empresa que tiene este problema. Esto es debido a que también pueden generarse picos de voltaje transitorios por el tipo de empresas industriales vecinas que se tenga, por ejemplo fábricas donde se realice constantemente soldadura.

2 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA SUMINISTRADA A LA EMPRESA

2.1 Características de la empresa

La empresa Aristoplast se encuentra ubicada en la 5ª avenida 3-52 de la zona 8, Granjas Gerona en San Miguel Petapa, y se dedica a la fabricación de todo tipo de bolsas plásticas, proceso que parte desde la extrusión de la resina plástica hasta el corte y sellado de las bolsas, incluyendo la serigrafía de las mismas en caso necesario.

Debido a que el proceso de producción de plásticos es continuo, la empresa trabaja veinticuatro horas durante catorce días en el área de extrusión de plástico. En el área de corte y sellado de las bolsas, se trabaja en dos turnos de ocho horas cada uno; pero en el segundo turno solamente trabajan de cuatro a seis máquinas, ya que de lo contrario las máquinas extrusoras no se darán abasto para suplir bobinas de película tubular a las cortadoras.

2.1.1 Tipo de acometida

La empresa cuenta con una acometida primaria subterránea, es decir que la alimentación proviene de la línea exterior de 13,200 V y llega a una subestación propia cuya capacidad es de 300 kVA y está formada por tres transformadores de tipo convencional con una potencia de 100 kVA cada uno y con voltajes de 13,200/7,620 voltios en el primario y 120/240 voltios en el secundario.

La acometida cuenta con una medición secundaria, que consta de tres transformadores de corriente, una caja de contador polifásico y un contador demandómetro. En la figura 5 puede observarse el tipo de acometida que tienen en la empresa.

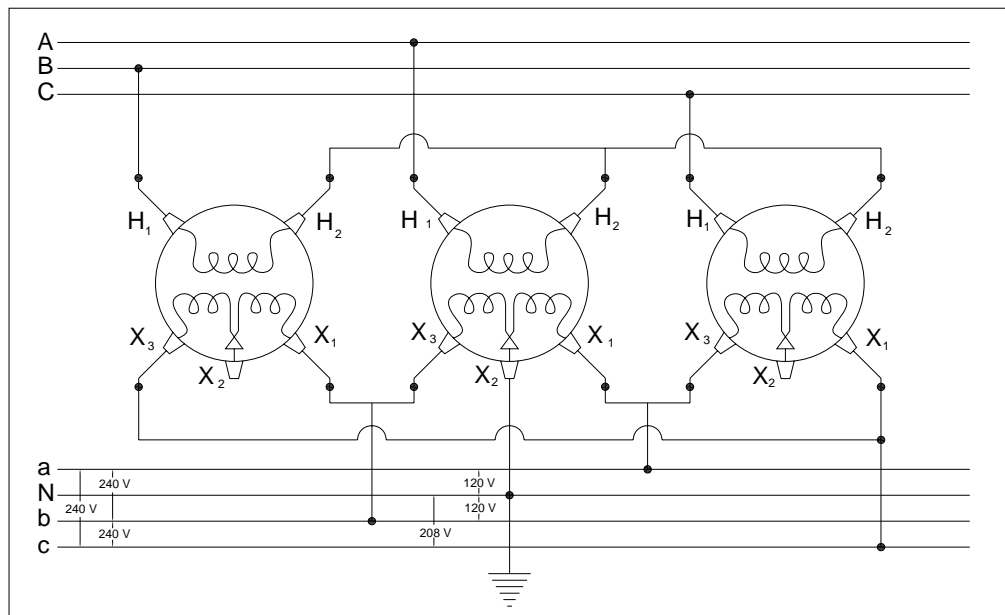
Figura 5. **Acometida de la empresa**



El banco de transformadores tiene una conexión estrella-delta aterrizada, la cual es utilizada debido a que su carga es, en su mayoría, trifásica.

Este tipo de conexión tiene alto grado de confiabilidad debido a que si uno de los transformadores se daña, los otros dos quedan trabajando con una conexión estrella abierta-delta abierta, con la cual pueden seguir suministrando potencia trifásica, pero con menor porcentaje de su capacidad total.

Figura 6. **Conexión estrella-delta del banco de transformadores de 300 kVA**



2.1.2 Caracterización de la carga

La carga en la empresa es, en su mayoría, trifásica debido a la maquinaria que se utiliza. La carga monofásica está formada únicamente por los sistemas de iluminación y computación que se tiene. Cuentan con un banco de capacitores de 125 kVAR que corrige el factor de potencia debido a que la carga inductiva que utilizan es muy grande, provocando que dicho factor sea bajo.

Los motores utilizados operan con un factor de potencia de 0.8. Cuentan con motores sobredimensionados, es decir que no consumen la potencia nominal de los mismos; así también, algunos motores trabajan en vacío, por espacios alternos. Lo anterior es causa de que haya mayor consumo de potencia reactiva en comparación con la potencia activa.

Por lo descrito, puede decirse que se tiene tres sistemas de cargas: cargas de iluminación, de equipos de datos y de fuerza. Las primeras corresponden a la iluminación de planta, bodegas y oficinas; las segundas corresponden al equipo de procesamiento de datos que se tiene en la empresa y también al de telecomunicación; y las terceras corresponden a los motores, compresores, aire acondicionado, etc., que se utilizan en la empresa.

2.1.3 Maquinaria y equipo utilizados en la empresa

Aristoplast cuenta con 21 máquinas de extrusión de plástico y 17 máquinas de sellado y cortado, las cuales le dan la medida necesaria a las bolsas. Los motores que utilizan las máquinas de extrusión son de diferente potencia, ocho son de 5 hp, siete son de 7.5 hp, cuatro son de 10 hp y dos de 15 hp.

También utiliza una máquina de impresión en cuya bobina de película tubular se coloca el diseño requerido por el cliente antes de pasar al corte y sellado de las bolsas plásticas. Además, usa un compresor de aire que trabaja con un motor trifásico de 10 hp que opera a una frecuencia de 60 Hz y 3400 rpm.

A continuación se dará una breve explicación del proceso de extrusión de plásticos, para tener una mejor visión de los problemas que puede ocasionar la mala calidad de la energía eléctrica suministrada.

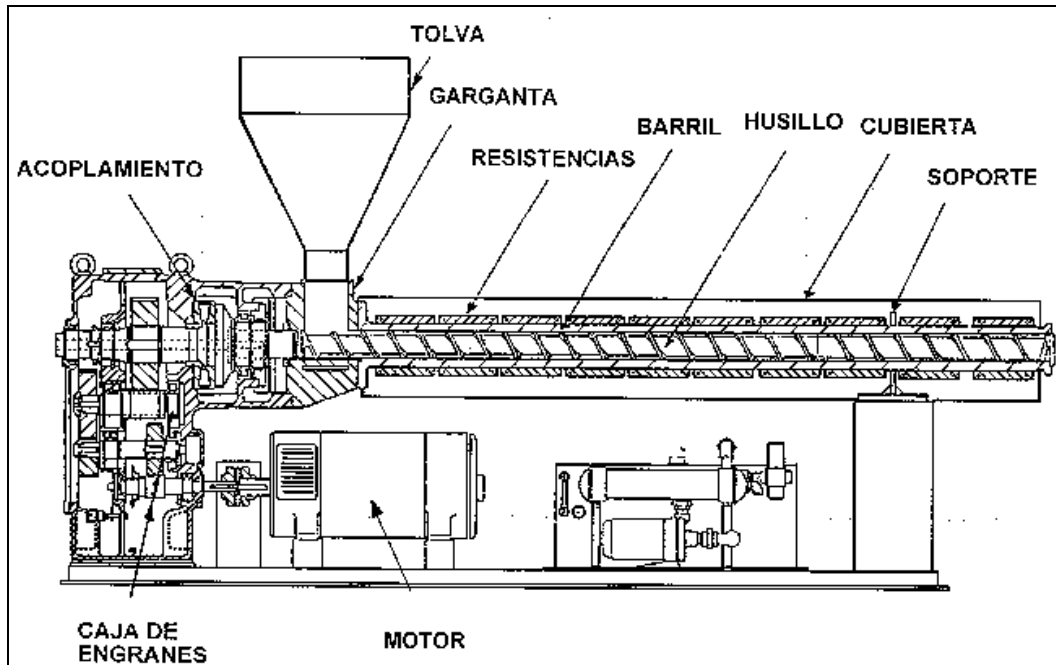
Los termoplásticos se fabrican por medio del extrusor, que es una máquina que procesa estos materiales. Para conseguir la forma final y el acabado del plástico, las técnicas utilizadas dependen de tres factores importantes: tiempo, temperatura y deformación.

Un extrusor consta de un mecanismo de transmisión y potencia, un cilindro, un tornillo sin fin, una malla de filtro (opcional) y controles apropiados de presión, temperatura y velocidad. También cuenta con un cabezal circular de salida donde es extruida la resina plástica para formar una especie de tubo que después se constituirá en el producto final.

En el proceso se utiliza resina de alto peso molecular, ya que mantiene la forma extraída al enfriarse; sin embargo, antes de utilizarla debe prepararse mezclándole diferentes aditivos que le ayudan a dar las características necesarias del producto final o que ayudan a su procesamiento adecuado.

El extrusor funde, comprime, mezcla y bombea el material a la sección de formado. Dicha sección es simplemente un cabezal con una boquilla de salida que le da la forma deseada al material fundido; todo esto mediante un proceso continuo. En la figura 7 se muestra un corte típico de un extrusor monohusillo.

Figura 7. Corte de extrusor monohusillo



Fuente: **Empaques plásticos de México, S. A. de C. V. Pág. 2**

El motor puede ser variable o fijo, y es el que da vueltas al tornillo que se encuentra dentro del cilindro, el cual, a su vez, es calentado eléctricamente por una resistencia. Aristoplast cuenta con motores fijos que trabajan a velocidades de entre 1000 rpm y 1800 rpm, dependiendo de la potencia del motor; las máquinas que utilizan para extrusión tienen motores de 5, 7.5, 10 y 15 hp.

Cada uno de los motores cuenta con variadores de frecuencia que regulan la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Los variadores utilizados dependen de la potencia consumida por el motor y van desde 1 hp hasta 10 hp. Estos, a la vez, ayudan a que el motor tenga un arranque más suave, mejorando la eficiencia del motor.

La resina es introducida en la tolva, que se conecta al cilindro por medio de una abertura. El material plástico es alimentado por gravedad a través de la tolva y se mueve en dirección horizontal por medio del tornillo. Este material, al pasar a través del cilindro, se funde y conforme se va fundiendo el canal del tornillo se va estrechando, lo que incrementa la presión interna forzando al material a salir por la boquilla. Una vez se tiene la forma básica deseada del material fundido, éste pasa a la sección de formado final.

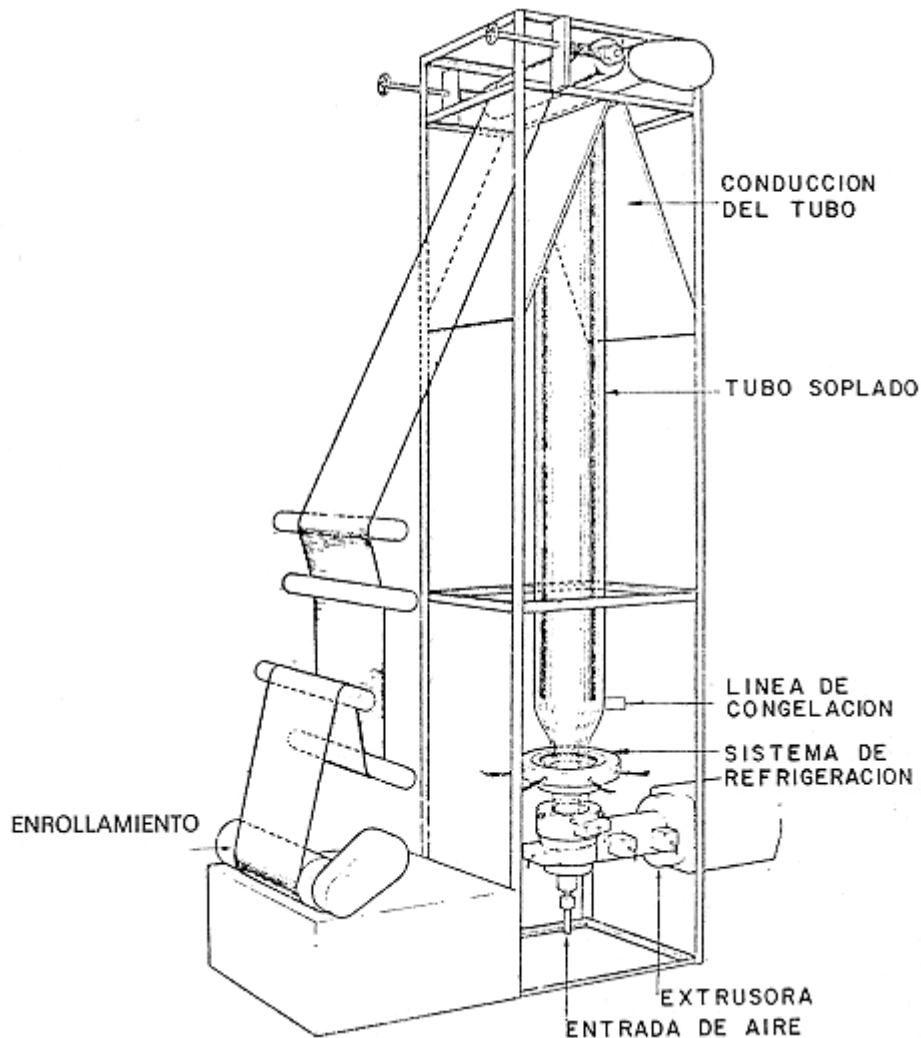
El sistema utilizado en Aristoplast es el de película soplada; esto quiere decir que al salir la resina fundida a través de la boquilla, se le introduce aire por el cabezal que, al inflar el material plástico, forma una burbuja cilíndrica. Al inflarse la burbuja, el material se va estirando y adelgazando hasta que adquiere las dimensiones requeridas. La burbuja se va enfriando por lo que el material se endurece, luego pasa por unos rodillos que le dan su forma final y por último la película de plástico es embobinada en forma de rollo; a esta forma del producto se le conoce como película tubular.

Todo el proceso debe realizarse de manera continua debido a la fundición de la resina y a la etapa de soplado; de lo contrario, la pérdida del material sería mayor.

Luego de tener el plástico como película tubular, ésta pasa al área de impresión, si es necesario, para colocarle la serigrafía que llevará la bolsa y por último pasa al área de corte y sellado donde se le da las dimensiones al producto final, siendo éste una bolsa con las medidas solicitadas por el cliente.

En la figura 8 puede observarse la maquinaria donde se realiza el formado final de la extrusión del plástico.

Figura 8. Línea de extrusión de película tubular



Fuente: **Empaques plásticos de México, S. A. de C. V. Pág. 3**

En el proceso de corte y sellado, el rollo de película tubular pasa por unos rodillos que estiran la película de plástico; luego pasa por unas mordazas selladoras y, una vez sellada la bolsa, será cortada por unas cuchillas. Las mordazas pueden utilizar dos métodos de sellado para realizar su función, utilizando calor y presión.

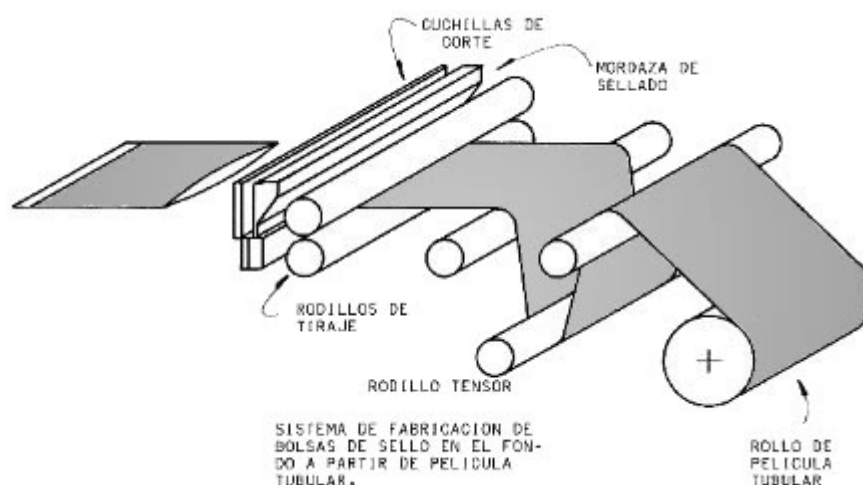
El primer método es llamado *sellado por presión* y consiste en que la película termoplástica, al pasar por la mordaza, es presionada por la misma y sus dos piezas son unidas por medio de la fusión de las superficies en la interfase.

Es importante indicar que el calor debe alcanzar el sitio del sellado por medio de transferencia a través de las capas de la película, aunque, debido a que la resina termoplástica es pobre conductora del calor, este sistema es práctico únicamente para películas muy delgadas de unas 125 a 150 micras (0.005 a 0.006 pulgadas).

El segundo método de sellado es el de *corte-sello*, que es cuando se realiza la fusión completa de la película. Aquí, una mordaza o cuchilla es calentada para fundir y cortar las películas termoplásticas dando como resultado dos sellos, uno en cada lado de ésta.

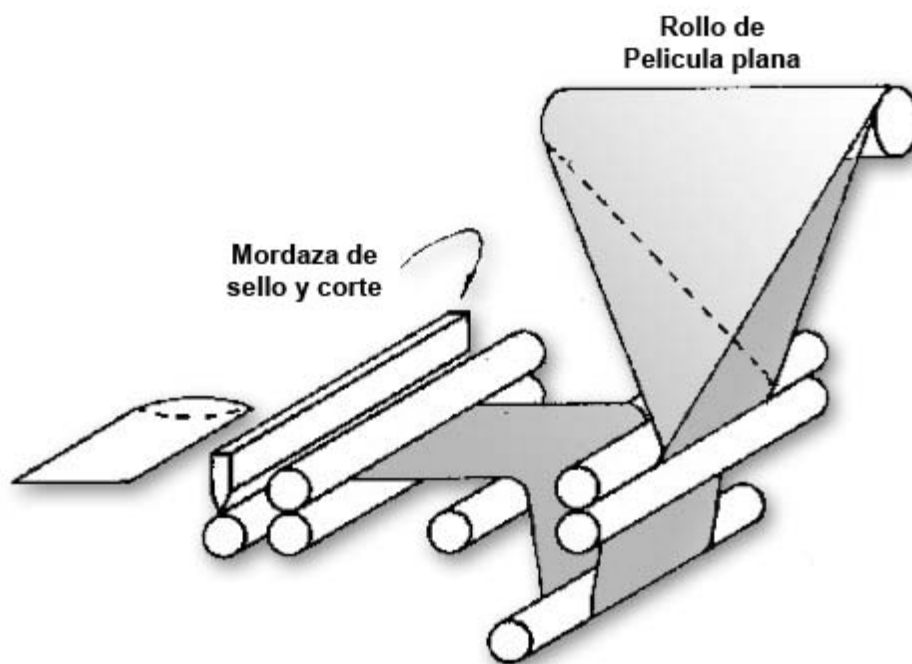
En la figura 9 se observa una máquina de sellado y corte de película tubular termoplástica cuyo sistema se basa en el sellado transversal, es decir que el sellado se realiza a lo ancho de la película.

Figura 9. **Sistema de sellado transversal**



En la figura 10 se muestra otro tipo de sellado que difiere del anterior, ya que parte de una película plana se dobla a la mitad y su sello queda lateralmente al mismo tiempo que es cortada y separada.

Figura 10. **Sistema de fabricación de bolsas selladas lateralmente a partir de película plana.**

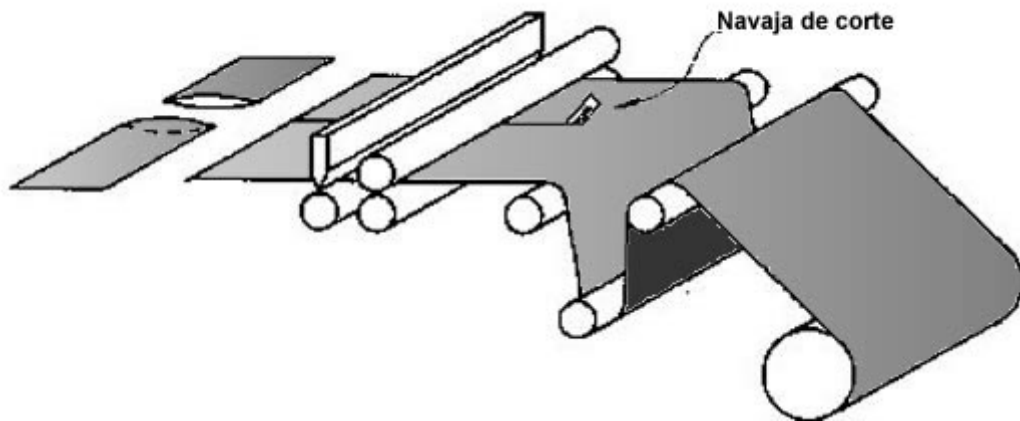


Fuente. Delgado, Eduardo. **La bolsa plástica, el comodín de los empaques.** Pág. 1

Este método no es muy utilizado debido a que las máquinas extrusoras generalmente fabrican películas tubulares y no planas haciendo el proceso de sellado más eficiente, ya que con una película plana se tendría dos áreas de sellado, una para sellar el doblar de la película y otra para realizar el sello y corte de la bolsa; mientras que con las películas tubulares sólo se necesita un área de sellado como pudo verse en la figura anterior.

El sistema de sellado transversal también puede utilizarse con una película tubular, cortándola por en medio con una navaja para obtener dos bolsas simultáneamente. Este sistema se puede observar en la figura 11.

Figura 11. **Sistema de fabricación de bolsas selladas lateralmente a partir de una película tubular**



Fuente. Delgado, Eduardo. **La bolsa plástica, el comodín de los empaques.** Pág. 2

En Aristoplast se utilizan los dos tipos de sellados para la fabricación de las bolsas plásticas, el lateral y el transversal; pero únicamente se utiliza el rollo de película tubular.

2.1.4 Tipo de protecciones del sistema

Actualmente la empresa cuenta únicamente con un juego de apartarrayos que protege la subestación contra sobrevoltajes inducidos por agentes externos a las instalaciones de la empresa. Cada apartarrayos es de 10 kV-10 kA; éstos están compuestos por un forro de material polímero para su protección de la intemperie. Su función es la de descargar un sobrevoltaje a tierra e interrumpir o prevenir el flujo de la corriente de frecuencia nominal, una vez que el sobrevoltaje ha sido desviado seguramente a tierra. En cuanto a la maquinaria, únicamente cuentan con interruptores termomagnéticos (también llamados flipones).

Sin embargo, la empresa no cuenta con protecciones que libren al sistema eléctrico de disturbios que puedan afectarlo durante un período muy corto de tiempo. Esto lo vuelve vulnerable a daños en los elementos sensibles a este tipo de perturbaciones, como lo son los transitorios eléctricos de voltaje y/o corriente.

2.2 Análisis de transitorios en la empresa

Para el análisis se tuvo que monitorear la alimentación de energía eléctrica a la empresa; esto se realizó durante cuatro meses con la finalidad de recopilar datos que muestren disturbios eléctricos de corta duración que se produzcan en las ondas de corriente y voltaje secundarios, los cuales afectan la energía eléctrica suministrada.

2.2.1 Antecedentes de los problemas ocasionados por interrupciones de suministro de energía eléctrica

Aristoplast es una empresa que ha tenido problemas en los últimos años, ya que sufren de cortes repentinos de energía eléctrica que duran desde milisegundos hasta varios minutos, los cuales producen pérdidas de materiales y daños en los equipos, afectando principalmente a los variadores de frecuencia de las máquinas extrusoras.

Estas fallas ocurren de una a tres veces por mes, de dos a tres veces al día. A la fecha han tenido que comprar varias tarjetas electrónicas debido a que, por incidencias y fallas de protecciones especializadas en el suministro de energía, se han dañado. Además, se tiene que tomar en cuenta la materia prima que se ha perdido, la pérdida de producción por tiempos muertos debido a los fallos, etc.

2.2.2 Medición de transitorios eléctricos

Para realizar el estudio se utilizó el *AEMC PowerPad*, que es un analizador de calidad de energía eléctrica trifásica cuyas mediciones son mostradas numéricamente y de forma gráfica por medio de formas de onda con diferente color para cada fase. Con éste se pudo monitorear el voltaje y la corriente durante períodos de tiempo para poder observar el comportamiento de la red y los disturbios eléctricos que sufrió la misma.

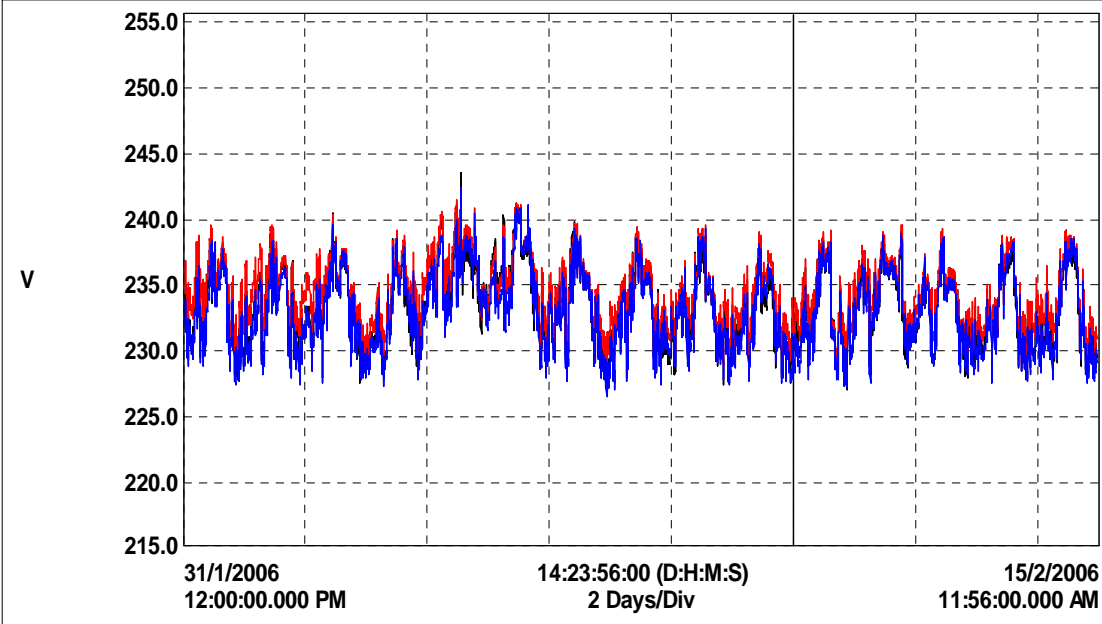
El equipo de medición fue conectado a los cables de suministro de energía del lado secundario de la subestación por medio de conectores especiales para voltaje y corriente. Con ello pudo tomarse datos del voltaje suministrado a las instalaciones, la carga que se tenía, el factor de potencia, potencia real, aparente y reactiva que entrega el banco de transformadores, etc.

Se tomó lecturas de datos reales cada 2 minutos durante un período de quince días; el procedimiento se repitió varias veces, dejando el analizador conectado durante un total de cuatro meses, para poder ver el comportamiento de las ondas senoidales de voltaje y corriente. Además, el equipo de medición cuenta con la opción de grabar hasta 50 transitorios eléctricos que puedan afectar al sistema

La toma de datos ayudó a detectar cualquier anomalía en el suministro de energía eléctrica a la empresa debido a transitorios, ya que el equipo de medición cuenta con la opción de grabar cuatro formas de onda para cada uno; la forma de onda de disparo, una pre y dos post formas de onda de disparo.

En la figura 12 se muestra la grafica de los valores de voltaje que se grabaron durante 15 días. Aquí puede verse que el voltaje de línea tiene una variación de ± 5 V y que el voltaje promedio es de 235 V.

Figura 12. Gráfica voltaje vrs. tiempo



3. ANÁLISIS DE RESULTADO Y POSIBLES SOLUCIONES AL PROBLEMA

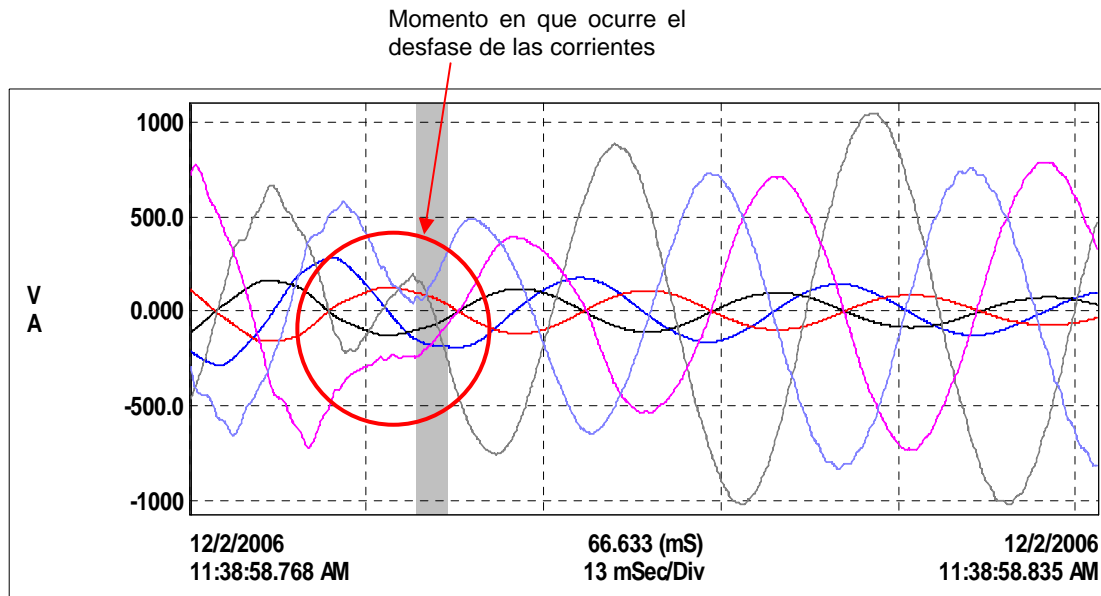
3.1 Causas que provocan perturbaciones de energía eléctrica en la empresa

Para poder conocer las causas que provocan las perturbaciones de energía eléctrica se realizó un análisis de los datos obtenidos con el equipo de medición de calidad de energía.

El equipo se colocó durante cuatro meses para poder monitorear el voltaje, el consumo de carga, la corriente y los disturbios eléctricos que puede sufrir la empresa. Durante el mes de febrero de 2006 se grabó un efecto transitorio que ocurrió el día domingo 12 del mismo. Como puede observarse en la figura 13, el efecto transitorio fue un bajo voltaje que ocurrió durante aproximadamente 30 ciclos (según la diferencia de tiempos de los transitorios capturados por el equipo de medición). En la gráfica se hace notar que la corriente, en el momento de ocurrir el transitorio, queda desfasada 180 grados con respecto al voltaje secundario.

En este caso el disturbio fue un cortocircuito momentáneo fuera de las instalaciones de la empresa, que pudo haber sido provocado por el choque de una rama de un árbol con una de las líneas o por un animal que ocasionó un cortocircuito al tocar las líneas de distribución. También puede observarse que el voltaje empieza a disminuir tendiendo a cero.

Figura 13. **Gráfica del transitorio eléctrico en su etapa inicial**



En la tabla II se muestran los datos de los voltajes y corrientes en sus valores rms al momento de la falla. Aquí puede verse que los valores son mucho menores que los valores nominales del sistema. Los voltajes disminuyen a valores muy por debajo de los límites, por lo que se supone que la protección del circuito de la EEGSA actúa abriendo el interruptor por un tiempo determinado y cerrando 30 ciclos después. De esa manera se sabe que el interruptor tiene control de recierre, llamado en el medio *recloser*.

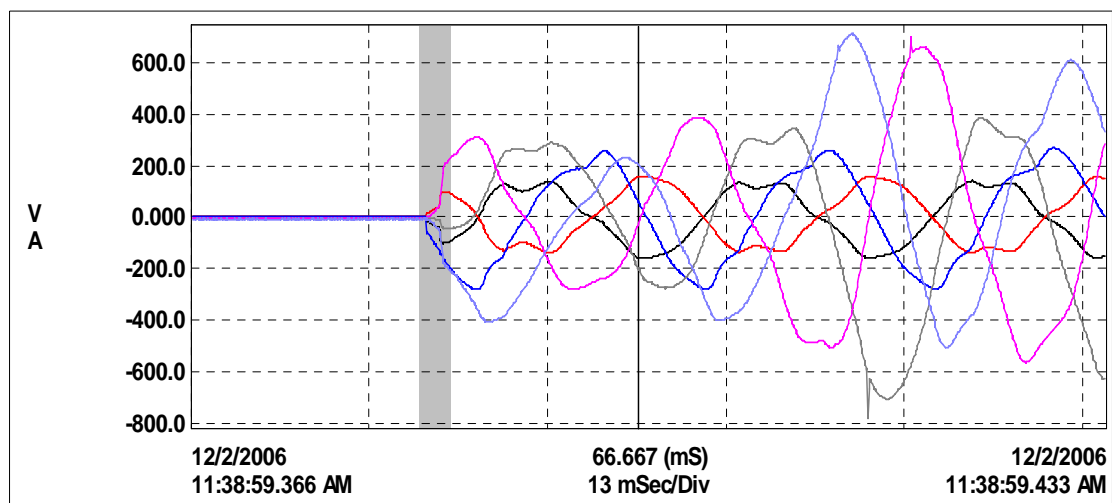
Tabla II. **Valores rms de voltaje y corriente al momento de la falla**

Voltajes y Corrientes de Línea	Fecha	Hora	Valor rms
Voltaje L3 (V)	12/02/2006	11:38:59 AM	137,2
Voltaje L1 (V)	12/02/2006	11:38:59 AM	79,8
Voltaje L2 (V)	12/02/2006	11:38:59 AM	79,8
Corriente L1 (A)	12/02/2006	11:38:59 AM	587,0
Corriente L2 (A)	12/02/2006	11:38:59 AM	448,7
Corriente L3 (A)	12/02/2006	11:38:59 AM	473,6

Durante la falla, el transitorio hace que el interruptor del circuito se abra para liberar y limpiar la misma y después de un tiempo determinado por el control de recierre de la EEGSA, el interruptor vuelve a cerrar para reestablecer el suministro de energía a la empresa.

En la siguiente gráfica se observa el período, de fracción de segundos, en el que la empresa quedó sin energía eléctrica y también se observa el momento en que la energía se reestableció

Figura 14. **Gráfica del transitorio eléctrico al momento del reestablecimiento de la energía**



En la gráfica también puede observarse que las formas de onda de las corrientes y los voltajes no son senoidales puras; esto se debe a que los arranques de los motores producen pequeños disturbios que deforman la onda senoidal.

Estos disturbios incluyen principalmente caídas de voltaje que se definen como variaciones de voltaje violentas y repetidas con una amplitud pequeña que pueden dañar otros elementos conectados a la red eléctrica.

Las caídas de voltaje son debidas a transitorios provocados por el gran consumo de corriente durante el arranque del motor, ya que, cuando el transitorio de corriente fluye por el sistema de potencia, las líneas de alimentación incrementan su carga.

El transitorio de corriente ocurre debido a que en el momento de arranque se da el mismo efecto que cuando se tiene el rotor bloqueado, ya que en este caso no se tiene una fuerza electromotriz que se oponga al paso de corriente y la impedancia del rotor es tan pequeña que puede llegar a considerarse como un corto circuito.

Al comenzar a girar el rotor, la corriente va disminuyendo hasta llegar a su valor nominal; en ese momento el rotor esta girando en su régimen permanente.

En la tabla III se muestran los valores de los voltajes y las corrientes al momento en que se vuelve a reestablecer la energía eléctrica al sistema y éste empieza a consumirla. Es de hacer notar que los valores, en ese momento, son bajos debido a que los motores de inducción no arrancan automáticamente.

Tabla III. Valores rms de los voltajes y corrientes después de la falla

Voltajes y Corrientes de Línea	Fecha	Hora	Valor rms
Voltaje L3 (V)	12/02/2006	11:38:59 AM	87,4
Voltaje L1 (V)	12/02/2006	11:38:59 AM	87,2
Voltaje L2 (V)	12/02/2006	11:38:59 AM	153,9
Corriente L1 (A)	12/02/2006	11:38:59 AM	263,9
Corriente L2 (A)	12/02/2006	11:38:59 AM	283,3
Corriente L3 (A)	12/02/2006	11:38:59 AM	289,3

Con el equipo de medición pudo establecerse que uno de los principales factores que provocan interrupciones en el suministro de energía eléctrica es la apertura de los interruptores de la línea de distribución debido a cortocircuitos externos. Para entender qué es lo que provoca estos cortocircuitos se hará una descripción de la ubicación de la empresa; de esa forma podrá tenerse una mejor idea del problema y plantear la mejor solución al mismo.

Sin embargo, también tiene que tomarse en cuenta otros factores que, en un momento dado, pueden afectar el suministro de energía. Para ello debe conocerse otros aspectos importantes de la empresa, por ejemplo los tipos de maniobras que realizan durante el día y las características del circuito eléctrico al que pertenece la misma.

3.1.1 Características de la ubicación de la empresa

En vista de que la empresa se encuentra ubicada en un lugar en cuyos alrededores hay bastante vegetación, la misma es vulnerable a disturbios eléctricos que se producen, por ejemplo, por una rama que toca una de las líneas de distribución o un animal, por ejemplo un ave, que tiene contacto con cualquiera de las fases y provoca un cortocircuito en el sistema.

Esto puede provocar un pequeño cortocircuito que reduce, durante un período corto, el voltaje suministrado o puede llegar a suspender el suministro de energía temporalmente. Este fue el caso de la falla que se dio durante el tiempo que se tuvo el equipo de medición conectado al sistema.

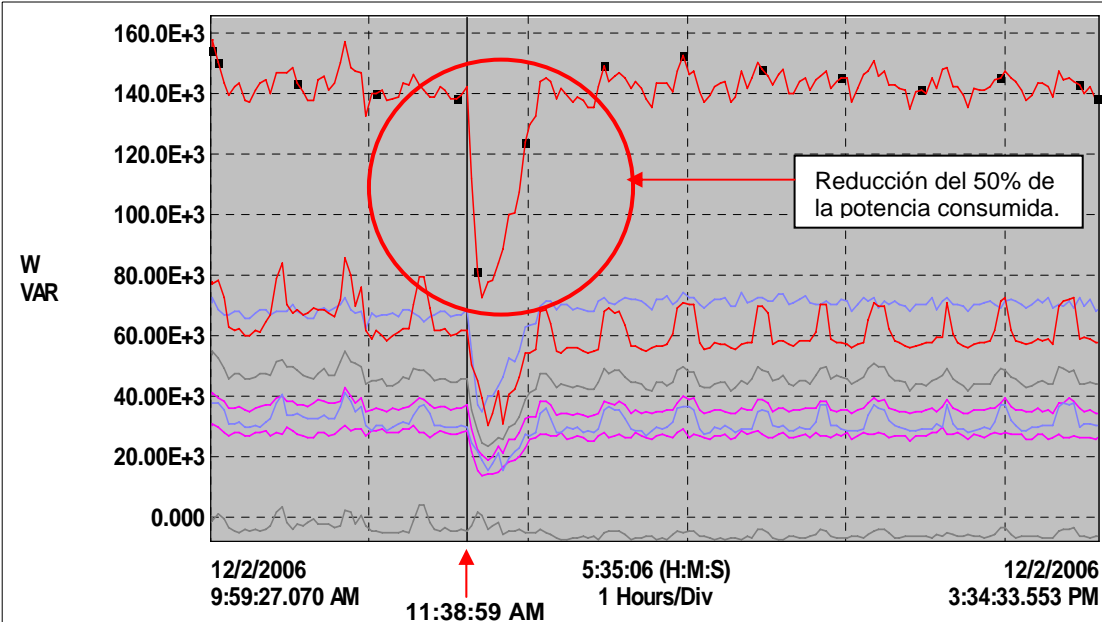
Como ya se mostró, el transitorio ocurrió por un *sag* de voltaje ocasionado por un cortocircuito externo. Éste provocó una suspensión de energía eléctrica que duró aproximadamente 2 segundos.

Este pequeño corte de energía afecta directamente las máquinas que cuentan con dispositivos automáticos sensibles, como controladores y microcomputadoras, ya que ocasiona que los mismos se reinicien y se pare el proceso de producción en ese momento.

En la figura 15 se muestra una grafica de la potencia activa y reactiva y su variación en el tiempo. Aquí puede observarse que en el momento en que ocurre la falla, la potencia consumida se reduce a un 50%, lo que significa que las máquinas con controladores electrónicos y protecciones sensibles se apagan.

Las máquinas que salen de operación no pueden ponerse en actividad inmediatamente, ya que tienen un proceso de arranque determinado por el manejo del plástico.

Figura 15. **Gráfica de potencia activa y reactiva vrs. tiempo**



En época de lluvia, el sistema corre mayor riesgo debido a descargas atmosféricas que, al caer lo suficientemente cerca, inducen un voltaje a la línea de distribución de energía, provocando disturbios en la misma debido a un sobrevoltaje. Además, como la lluvia provoca que la vegetación crezca y el viento la agita, las hojas hacen contacto con las líneas directamente. Esto repercute en las instalaciones de la empresa provocando cortes momentáneos o permanentes de energía.

3.1.2 Maniobras efectuadas diariamente en la empresa

Cuando se hace referencia a las maniobras efectuadas en la empresa, se alude a todos los cambios de estado en el sistema eléctrico, realizados diariamente por el personal o automáticamente. Por ejemplo, arranques de maquinaria, arranque automático de motores que se utilizan para compresores, aire acondicionado, etc.

A pesar de que la falla detectada por el equipo de medición no fue provocada por una maniobra, es importante mencionar que dichas maniobras pueden ser responsables de producir *sags* de voltaje al sistema.

La carga de la empresa es, en su mayoría, trifásica, por lo que un mal balance de cargas puede sobrecargar un circuito y ocasionar transitorios eléctricos en el sistema. Esto ocurre porque al sobrecargarse el circuito, el interruptor magnético del mismo puede llegar a abrirse y cuando se vuelve a cerrar, la corriente en el momento del cierre puede llegar a ser hasta tres veces la corriente nominal del circuito.

El arranque de las máquinas puede ser otra causa que provoque disturbios eléctricos en las instalaciones. Esto es debido a que, como se mencionó, en el arranque de los motores de inducción utilizados para la maquinaria, la corriente de arranque puede ser tres o seis veces la corriente nominal, por lo cual el voltaje en los conductores de alimentación y en el sistema disminuye notablemente y dicha caída de voltaje puede llegar a sobrepasar el máximo permisible.

La empresa utiliza un compresor cuyo motor trifásico es de una potencia de 10 hp y una corriente nominal de 29 amperios. Éste arranca periódicamente durante el día debido a que una de las máquinas de corte y sellado trabaja por medio de aire comprimido, por lo tanto, cuando la presión del aire baja del límite al cual funciona la máquina, el compresor entra en funcionamiento para restaurar la presión del aire.

3.1.3 Características del circuito eléctrico al cual pertenece la empresa

Al hablar de las características del circuito eléctrico al cual pertenece la empresa, se está haciendo referencia a aquellas cargas externas que pueden generar fallas, provocando que otro consumidor experimente *sags* de voltaje durante el período en que la falla se encuentre en el sistema.

Se constató que la empresa Aristoplast no se encuentra dentro de un circuito de suministro eléctrico que cuente con mucha industria; el circuito al que pertenece suministra energía, principalmente, a áreas residenciales, bodegas y un taller de herrería.

Como ya se ha mencionado, un taller donde se utiliza soldadura eléctrica puede llegar a suministrar fallas al sistema y provocar cortocircuitos que hacen que el voltaje baje considerablemente o elimine el suministro de energía durante un período de tiempo muy pequeño, dependiendo siempre de la velocidad de operación de los *recloser* del circuito. Sin embargo, debido a que el taller no es grande, éste no presenta peligro alguno de causar fallas al sistema, ya que, para ello, la corriente nominal de soldadura debería ser de un porcentaje apreciable respecto de la carga total que lleve en ese momento la línea de distribución.

3.2 Efectos provocados por transitorios eléctricos en el sistema eléctrico de la empresa

Como se ha mencionado, cuando ocurren transitorios eléctricos en el sistema que alteran el suministro de energía a la empresa, se producen efectos negativos en el proceso de producción. En Aristoplast, el proceso de producción es continuo debido al sistema de elaboración de las bolsas de plástico, por lo que un corte de energía eléctrica, por muy poco que dure, puede llegar a ocasionar pérdidas significativas.

3.2.1 Interrupciones del suministro eléctrico

Las disminuciones momentáneas de voltaje y perturbaciones momentáneas o sostenidas del suministro de energía del exterior pueden causar un funcionamiento deficiente en la maquinaria utilizada en la empresa o una interrupción total de las cargas críticas. Al suspenderse la alimentación de energía a estas cargas críticas, se producen tiempos muertos en la producción y costos por pérdidas de material o posibles daños al equipo.

Al momento en que ocurrió la falla en la línea de distribución, ésta ocasionó una baja de voltaje que afectó el sistema eléctrico de la empresa provocando un corte de energía de una duración de milisegundos.

Como pudo observarse en la figura 14, durante una fracción de segundo, el sistema eléctrico dejó de suministrar voltaje a la línea, es decir que en ese momento se abrió el interruptor del sistema de distribución para poder librar la falla y que ésta no llegara a dañar a los usuarios.

3.2.2 Problemas durante el proceso de producción

Los transitorios eléctricos pueden llegar a perjudicar seriamente el proceso de producción de la bolsa de plástico. Esto es porque cualquier disturbio en el sistema eléctrico puede provocar un paro en el área de extrusión de plástico, y esto ocasiona daños al equipo y pérdida de materia prima y producto terminado.

3.2.2.1 Daños ocasionados a la maquinaria y equipo utilizado

Durante esta falla no se produjo ningún daño serio a la maquinaria y equipo electrónico de la empresa, ya que no hubo picos de voltaje sino sólo una reducción de voltaje y un microcorte de energía eléctrica. Sin embargo, al ocurrir este tipo de fallas constantemente puede llegar a deteriorar equipos de mayor sensibilidad (el aislamiento en especial) como por ejemplo los variadores de frecuencia que están ligados a las máquinas extrusoras y pueden provocar paros prolongados que afectan el volumen de producción.

Por lo descrito, el daño a los equipos sensibles es uno de los principales problemas en la empresa, ya que, al año, tienen que comprar de cuatro a seis tarjetas electrónicas que se queman al ocurrir transitorios eléctricos en el sistema.

Estas tarjetas son las que se utilizan en los controladores electrónicos del proceso de extrusión, de manera que al haber un daño provocan disminuciones en el volumen de producción y, por lo tanto, pérdidas económicas por los tiempos muertos.

3.2.2.2 Pérdidas o daños al producto elaborado

A pesar de que no ocurrió ningún daño en los equipos electrónicos o en la maquinaria, sí ocurrió un paro total en la producción debido a la baja de voltaje.

Si bien el paro que ocurrió duró una fracción de segundo, fue suficiente para provocar que la burbuja de plástico, que se forma en los extrusores, se rompiera. Como consecuencia, fue necesario detener las extrusoras para quitar la bobina de plástico y colocar una nueva, así como realizar una limpieza a la máquina para poder empezar de nuevo.

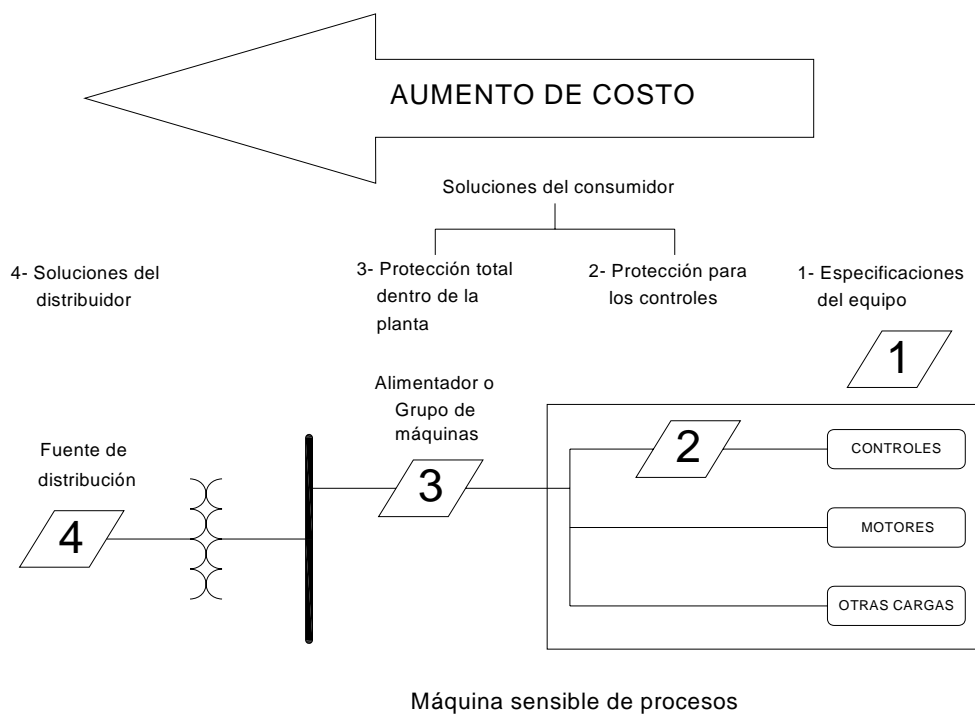
Al comenzar nuevamente el proceso, se pierde tiempo y material en volver a obtener las dimensiones de la burbuja de plástico para darle, una vez más, el grosor necesario a la película tubular de plástico. Del material que se pierde en el paro y arranque de las máquinas, muy poco es el que se puede reutilizar debido a que se ensucia.

En el área de corte y sellado, es menor el desperdicio al ocurrir una interrupción en la energía eléctrica, ya que, en este caso, sólo se pierde la bolsa que se está fabricando debido a un mal sellado. De tal manera, el problema se enfoca en el área de extrusión del plástico.

3.3 Soluciones para contrarrestar los disturbios que afectan el sistema eléctrico de la empresa

Existen varias soluciones que puede considerarse para reducir el número y la gravedad de sags de voltaje y reducir la sensibilidad de los equipos a los mismos. Esto puede ser realizado por el distribuidor, el consumidor y el fabricante del equipo utilizado. En la figura 16 se muestran las soluciones alternativas a este problema y su costo relativo.

Figura 16. Niveles de protección contra sags de voltaje



Fuente: Roger C. Duncan, Mark F. McGranaghan y H. Wayne Beaty. **Electrical power system quality. Pág. 45**

Como puede verse en la figura anterior, resulta más económico atacar el problema desde el nivel más bajo, lo más cerca posible de la carga.

En el nivel más próximo de protección, puede considerarse la utilización de equipos de suministro ininterrumpible de potencia. Estos pueden usarse cuando los controles de la maquinaria no soportan bajas de voltaje y apagan las máquinas, independientemente de que éstas sí soporten esas bajas.

Tomando en cuenta lo analizado, debe considerarse la forma de contrarrestar las fallas en el sistema eléctrico que producen bajas de voltaje, ocasionando paros en la maquinaria que utiliza la empresa. Para ello se tomó en cuenta, principalmente, los arranques del motor eléctrico para el compresor y cortocircuitos externos a la instalación.

El arranque del motor eléctrico puede mejorarse utilizando un sistema de arranque que minimice el alto consumo de corriente y evite caídas de voltaje que pueden afectar a otros equipos conectados al sistema.

Para contrarrestar las interrupciones en el suministro de energía eléctrica por cortocircuitos externos, debe contarse con un equipo que logre suministrar energía eléctrica durante la falla para evitar que la maquinaria de extrusión de plástico, que resulta ser la más afectada y la que produce mayores pérdidas, pare su proceso continuo de fabricación de bolsas plásticas.

3.3.1 Sistemas de arranque para el motor de inducción del compresor

Como se mencionó, el arranque de este motor de inducción provoca una caída de voltaje durante un período muy corto de tiempo, ocasionando leves apagones en las máquinas que se encuentran trabajando al momento del arranque.

El voltaje de alimentación de la máquina no debe ser menor al 5% de su valor nominal. Esta caída se debe a que la corriente de arranque, que es mucho mayor a la nominal de un motor, fluye a través de la impedancia del sistema, y si los dispositivos de protección no están bien coordinados pueden censarlas como corrientes de falla.

Una solución a este problema es hacer que el arranque del motor sea más suave, es decir, reducir la corriente durante el período de arranque del motor y así disminuir el impacto de los frecuentes arranques en el perfil del voltaje de la red eléctrica. El método más simple para suavizar el arranque de los motores es el arrancador estrella-delta. Éste consiste en conectar la máquina inicialmente en estrella y cuando el deslizamiento es pequeño su conexión cambia a delta. De esta manera el voltaje final de cada bobina de la máquina es igual a su propio voltaje nominal.

3.3.1.1 Arrancador estrella-delta

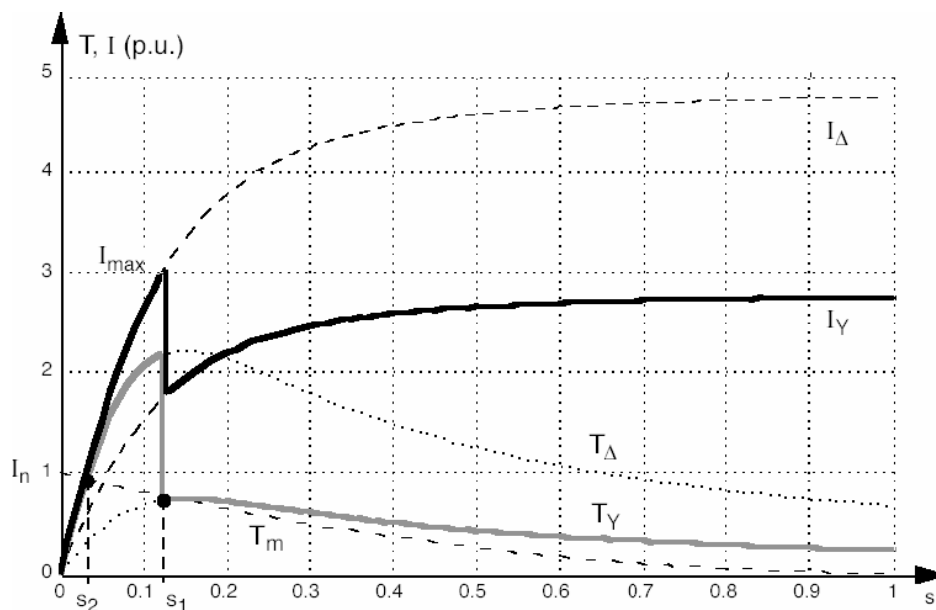
Este tipo de arrancador es muy económico y para la empresa es una de las mejores opciones, ya que, debido a que su conexión secundaria es en delta, el motor trabajará perfectamente en su régimen permanente.

Con este tipo de arranque la máquina realiza el cambio de conexión al alcanzar el deslizamiento de operación. La orden del cambio es dada por un temporizador, ya que si el cambio de conexión se realiza antes de que las corrientes disminuyan, el arrancador pierde efectividad.

Para especificar las protecciones del motor, debe tomarse en cuenta que el tiempo total de arranque, con ese dispositivo, es aproximadamente tres veces mayor que el arranque en directo.

En la figura 17 puede observarse la gráfica de un arranque en estrella-delta. Se puede ver que la corriente máxima no excede de 3 en p.u., mientras que en arranque directo puede ser hasta de 5 en p.u.

Figura 17. Torque y corriente durante un arranque estrella-delta

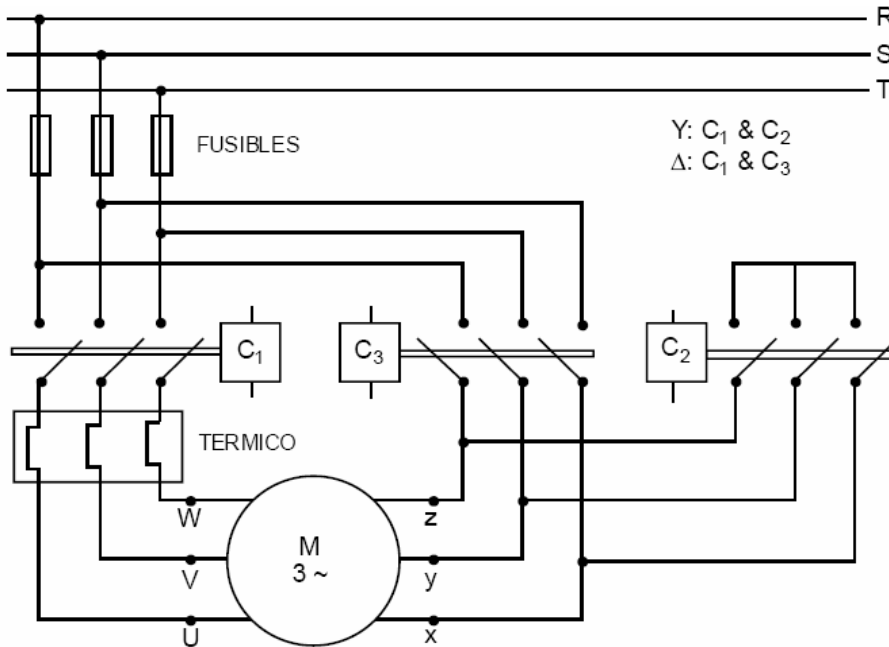


Fuente: José Manuel Aller. **Conversión de Energía Eléctrica. Universidad Simón Bolívar. Pág. 226**

En un diagrama típico de arrancador estrella-delta debe utilizarse tres contactores y un temporizador que los activa. Además debe contarse con protecciones térmicas para desconectar la máquina en caso de que ocurra una sobrecarga. En la figura 18 puede observarse el diagrama del que se está haciendo referencia.

En el diagrama podemos observar que los contactores C_1 y C_2 arrancan el motor en conexión estrella y un temporizador da la señal a los contactores para hacer el cambio de conexión y queda C_1 y C_3 trabajando en delta a régimen permanente.

Figura 18. **Conexión de los contactores en una conexión estrella-delta**



Fuente: José Manuel Aller. **Conversión de Energía Eléctrica. Universidad Simón Bolívar. Pág. 226**

3.3.1.1.1 Cálculos del funcionamiento de un arrancador estrella-delta

Al realizar el arranque con un sistema estrella-delta es posible aplicar un 57% del voltaje de línea al motor durante la primera etapa del arranque (conexión estrella) y el 100% en la segunda etapa (conexión delta). Estas relaciones se pueden apreciar en la ecuación siguiente:

$$V_Y = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = 0.57V_L$$

Donde:

V_Y = voltaje en el motor conectado en estrella

V_L = voltaje de línea

Entonces, como el voltaje de línea es 240 V, al estar conectado en estrella el voltaje que alimentará el motor será:

$$V_Y = \frac{240 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 139 \text{ V}$$

Lo anterior significa que el voltaje que alimenta el motor durante el arranque se reduce 1.73 veces. Debido a que esta relación es fija, y como la influencia del voltaje sobre la corriente es cuadrática, la corriente de arranque se reduce en tres veces.

El motor tiene una corriente nominal de 29 A y en el momento del arranque la corriente puede llegar a 145 A; sin embargo, si el motor arranca con una conexión en estrella, por lo mencionado anteriormente, la corriente de arranque se reducirá a 48 A, minimizando la caída de voltaje de la red eléctrica de la empresa.

Una vez el motor ha empezado a girar, no debe realizarse el cambio de conexión hasta que el motor haya adquirido una velocidad del 80% de la nominal, es decir hasta que la corriente de arranque baje prácticamente a su valor nominal en la etapa de conexión en estrella.

Para realizar el cambio de conexión se utiliza el temporizador. Normalmente, el arranque puede durar de 10 a 12 segundos para lograr conseguir las condiciones descritas. Si no se cumple con lo anterior, el pico de corriente que se produce al pasar a la conexión delta es demasiado alto, lo que perjudica a los contactores, al motor y a la máquina accionada. El efecto resulta ser similar al que ocurre con un arranque en directo.

3.3.2 Sistema de suministro ininterrumpible de potencia

Para lograr contrarrestar interrupciones de energía eléctrica, la carga necesita un sistema que pueda reaccionar dentro de medio ciclo y pueda suministrar una potencia casi normal por un lapso de dos segundos mientras el voltaje se restaura completamente. Para ello se necesita una fuente de energía almacenada en el sitio o una fuente de energía auxiliar. Ambos equipos deben ser capaces de hacer la transferencia rápidamente o estar siempre en línea.

Normalmente, por economía, la protección únicamente se aplica a las cargas críticas en la planta. Frecuentemente, las cargas críticas pueden protegerse con algunos controles electrónicos o computadoras, y comúnmente pueden emplearse las fuentes de poder ininterrumpido (en adelante *UPS*, por sus siglas en inglés, *uninterruptible power supply*) para eliminar el problema.

3.3.2.1 Fuentes de poder ininterrumpido (*UPS*)

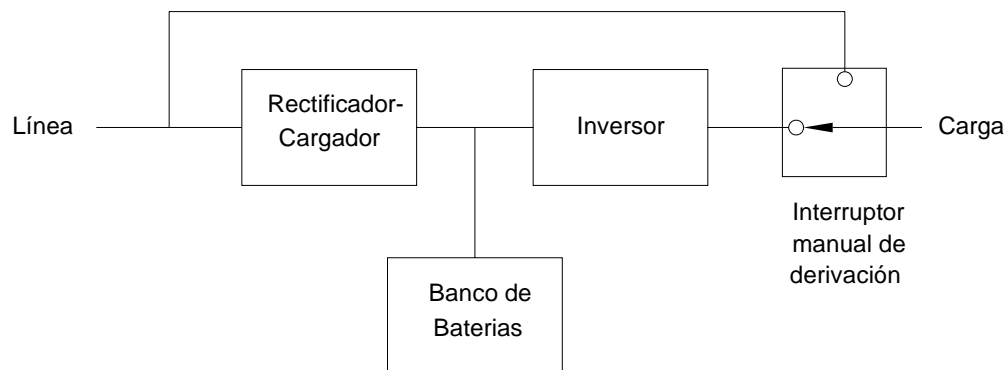
Una *UPS* es un dispositivo o equipo capaz de suministrar potencia o energía cuando ocurre una interrupción del suministro normal de la misma. Además, puede agregarse otras funciones que mejoran el suministro de energía a los equipos que se encuentran conectados a ella. Puede obtenerse una mejor estabilidad de la energía eléctrica entrante, aislamiento de la fuente de energía normal, corrección de la forma de onda, corrección de la frecuencia de línea, monitoreos de energía en línea para mejorar la protección, etc.

Debido al tipo de proceso de producción que se tiene en la empresa, es necesario utilizar *UPS* en línea, ya que éstos, por la forma en que están conectados, no dejan de suministrar potencia en ningún momento y además regulan el voltaje.

3.3.2.1.1 Esquema de una UPS en línea

Una UPS en línea es aquella que está permanentemente alimentando la carga independientemente del estado que tenga la línea de energía eléctrica. En la figura 21 puede observarse el esquema de una UPS en línea.

Figura 21. Esquema de una fuente de poder ininterrumpido en línea



Fuente: Roger C. Duncan, Mark F. McGranaghan y H. Wayne Beaty. **Electrical power system quality. Pág. 49**

En el esquema puede verse que la potencia en AC entrante es rectificadora en DC y ésta última carga un banco de baterías. Luego, esta potencia en DC pasa por un inversor que la convierte a potencia en AC para alimentar la carga.

Al tener este tipo de esquema, la carga no detecta de donde proviene la energía que la alimenta y por lo tanto no presenta interrupciones en su salida; es decir, si la energía proveniente del cargador se interrumpe a causa de un corte de energía, el sistema seguirá alimentando la carga.

3.3.2.1.2 Cálculo del funcionamiento de una UPS

Los variadores de frecuencia deben conectarse a una UPS monofásica que pueda suministrarle energía durante el tiempo que dure una falla. La UPS es alimentada con un voltaje de 240 V que pasa por un rectificador que lo convierte en un voltaje en corriente directa para cargar las baterías que alimentaran la carga cuando ocurre la falla.

Las baterías que tiene la UPS tienen un tiempo de carga de 24 horas (carga completa) ó 12 horas (90% de la carga). Las baterías suministran un voltaje que al pasar por un inversor se transforma en un voltaje en corriente alterna de 240 V. El tiempo que puede suministrar el voltaje al controlador puede variar dependiendo del fabricante y de la capacidad de la UPS.

La corriente consumida por la UPS puede calcularse por medio de la ecuación siguiente:

$$I_{UPS} = \frac{P}{V}$$

Donde:

I_{UPS} = corriente consumida

P = capacidad de la UPS

V = voltaje monofásico de la red de energía eléctrica de la empresa

Entonces si se coloca una UPS cuya capacidad es de 6 kVA la corriente que consumirá es:

$$I_{UPS} = \frac{6 \times 1000}{240} = 25 \text{ A}$$

Además, la *UPS* puede soportar un pico de corriente de hasta tres veces su corriente nominal, en este caso podrá soportar hasta 75 A. También, como se mencionó, la *UPS* regula el voltaje de salida en un máximo de +/- 3%, para poder suministrar un voltaje más estable al controlador. Esto significa que si el voltaje tiene una caída del 5% del valor nominal ($240\text{ V} - 0.05 \cdot 240\text{ V} = 228\text{ V}$), la *UPS* regula el voltaje para suministrarlo con una caída del 2% ($240\text{ V} - 0.02 \cdot 240\text{ V} = 235\text{ V}$).

3.3.2.1.3 Desventaja de la utilización de equipos *UPS*

Al instalar *UPS* al sistema, la red de energía los detecta como cargas no lineales que se comportan como fuentes de corriente que producen armónicos. Esto puede provocar calentamiento en los equipos y cables de alimentación, así como calentamiento en máquinas y transformadores debido a pérdidas adicionales de energía. Sin embargo, esto puede solucionarse colocando filtros armónicos, los cuales bloquean o atrapan la energía de los armónicos de tal manera que no fluyan por los equipos o no entren en el sistema.

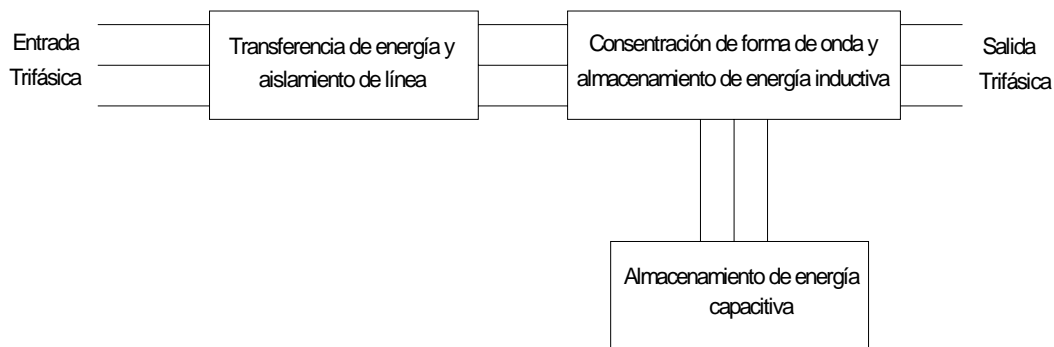
3.3.3 Sintetizadores magnéticos

Los sintetizadores magnéticos son utilizados para cargas de muchos kilovoltio-amperios en computadoras grandes y otro equipo electrónico que es sensible al voltaje suministrado.

El sintetizador magnético es un dispositivo que toma la potencia suministrada y la regenera para obtener una forma de onda trifásica de salida en AC limpia. Esto quiere decir que elimina problemas como el ruido en la línea. La transferencia de energía y aislamiento de la línea se obtiene por medio de supresores no lineales.

Las formas de onda, en AC, de salida se crean combinando pulsos de voltaje obtenidos desde transformadores saturados; la energía es almacenada en los transformadores de saturación y en capacitores, como corriente y voltaje. Esta energía almacenada habilita la salida de una forma de onda limpia y con poca distorsión armónica. Finalmente, se suministra potencia trifásica a través de un transformador conectado en zigzag. En la figura 22 se muestra un esquema de un sintetizador magnético.

Figura 22. **Diagrama de bloques de un sintetizador magnético**



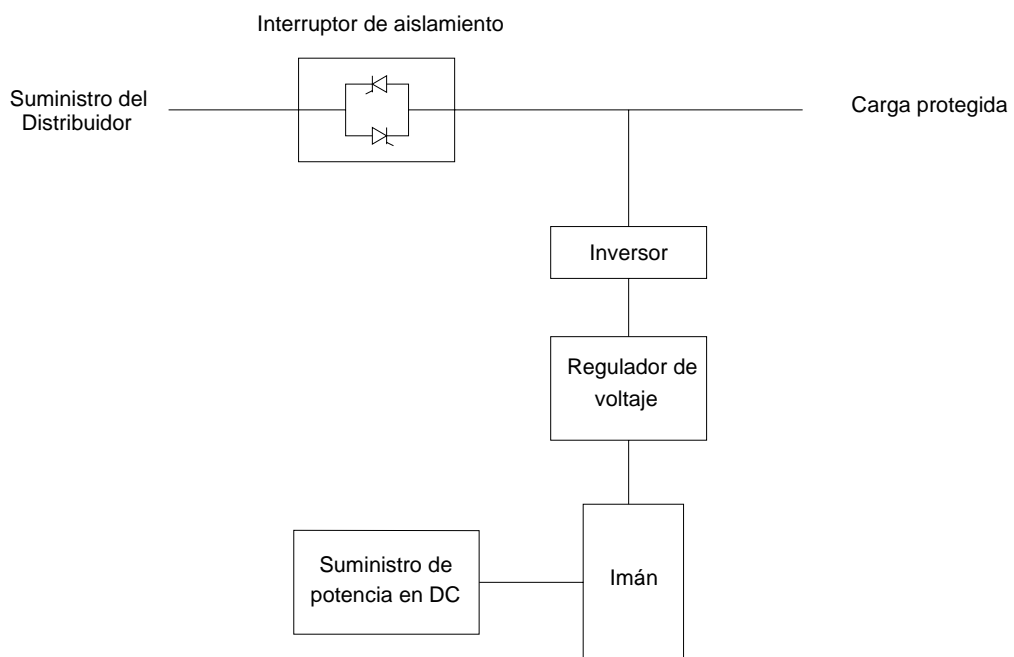
Fuente: Roger C. Duncan, Mark F. McGranaghan y H. Wayne Beaty. **Electrical power system quality. Pág. 48**

3.3.3.1 Dispositivo de almacenamiento de energía por medio de superconducción magnética

Un dispositivo de almacenamiento de energía *SMES* (por sus siglas en inglés, *Superconducting Mangnetic Energy Storage Device*) utiliza un imán superconductor para almacenar energía, de la misma manera que una *UPS* utiliza baterías para almacenarla. La principal ventaja de un *SMES* es el poco espacio físico que necesita para el imán en comparación al espacio utilizado para las baterías de una *UPS*. Además, en un *SMES* se requieren menos conexiones eléctricas, de manera que su infalibilidad es mayor y su mantenimiento menor.

Actualmente, diseños de estos dispositivos están siendo probados en diferentes localidades de Estados Unidos de América con resultados favorables.

Figura 23. **Diagrama de un dispositivo de almacenamiento por superconducción**



Fuente: Roger C. Duncan, Mark F. McGranaghan y H. Wayne Beaty. **Electrical power system quality. Pág. 51**

4. ASPECTO ECONÓMICO

4.1 Beneficios de la inversión en un sistema de protección contra disturbios eléctricos

De acuerdo a los fenómenos que afectan a la industria de plásticos puede concluirse que la causa principal del paro de la producción son los microcortes de energía eléctrica provocados por fuentes externas, debido a la apertura de los interruptores de la línea de distribución y a las descargas atmosféricas que pueden provocar daños a la maquinaria utilizada. Por lo tanto, la empresa tiene la opción de invertir en un sistema que proteja los equipos más sensibles de disturbios transitorios ocasionados por los fenómenos externos y a la vez minimice dichos microcortes de energía.

Para proteger las tarjetas electrónicas de los controladores de las máquinas extrusoras se puede utilizar una *UPS* en línea. Este sistema de protección también minimiza los paros constantes de la maquinaria, ya que, como se mencionó, hay veces que la misma puede soportar una leve reducción de voltaje; sin embargo, ésta provoca que la maquinaria deje de trabajar debido a que el controlador toma como falla el microcorte de energía.

Como la *UPS* mantiene energizado el sistema en todo momento, también pueden conectarse las máquinas más sensibles a una; sin embargo, a pesar de ser la opción más segura, resulta demasiado caro colocar *UPS* para sistemas trifásicos.

Además, los controladores deben protegerse contra sobretensiones transitorias provocadas por descargas atmosféricas. Un rayo, al caer cerca de la línea de distribución induce un voltaje a la misma provocando un pico de voltaje. Actualmente, éstos son suprimidos por los apartarrayos de la subestación; sin embargo, es aconsejable colocar un supresor de transitorios que proteja los equipos más caros y sensibles de dichos picos.

Internamente, en la empresa, se analizó que una causa que puede llegar a ocasionar problemas con transitorios eléctricos es el arranque del motor del compresor de aire, ya que éste arranca y se detiene constantemente cada 10 ó 15 minutos. Esto significa que en el transcurso de un día el motor del compresor arranca 90 veces aproximadamente.

Estas conmutaciones del motor pueden llegar a perjudicar el sistema eléctrico de la empresa, debido a que no tiene un arranque suave, y produce pequeños picos de corriente que provocan reducciones en el voltaje suministrado a la instalación.

4.1.1 Tiempos muertos debido a problemas en el suministro de energía y costos por pérdida de material

Al tiempo que la empresa permanece sin energía eléctrica se le llama tiempo muerto y va desde milisegundos hasta varios minutos; sin embargo, es tiempo suficiente para que la maquinaria extrusora deje de operar correctamente y se tenga problemas con el producto.

Además, debe tomarse en cuenta que al apagarse la maquinaria, ésta no puede volver a trabajar inmediatamente porque los controladores se apagan y, como cualquier computador, se debe reiniciar el programa.

Lo anterior provoca más tiempo perdido, ya que los operarios tienen que volver a programar los controladores de las extrusoras y para entonces se corre el riesgo de que se enfríe la resina fundida. Todo esto no ocurriría si los controladores tuvieran un suministro ininterrumpible de energía.

Al enfriarse la resina se produce otro problema más, pues hay que limpiar el extrusor porque la burbuja de plástico que se forma a la salida del extrusor se rompe y quedan residuos de material. En ese momento debe cambiarse la bobina de película tubular para poder comenzar de nuevo el proceso.

A continuación se presenta la tabla IV que muestra los tiempos estimados que tarda un operador al realizar cada una de las operaciones necesarias para hacer que una máquina vuelva a producir desde el momento en que se da la falla.

Tabla IV. **Tiempo estimado para volver a poner en funcionamiento una máquina de extrusión de plásticos**

Operación realizada	Tiempo estimado (minutos)
Programación de controladores	5
Limpieza de extrusor	10
Quitar bobina de película tubular	3
Colocar nuevo rodillo para bobina	2
Limpieza general de maquinaria	10
Arranque de la maquinaria (tomando en cuenta el calentamiento de la resina)	5
Ajuste de medidas para la burbuja de plástico	10
Tiempo perdido	45

Como puede observarse, el tiempo total perdido es de 45 minutos, de manera que como la empresa tiene 21 máquinas extrusoras y utiliza 3 operarios para el área de extrusión, ello quiere decir que cuando ocurre una falla, que hace que paren todas las extrusoras, por lo menos 3 máquinas permanecerán apagadas por un lapso de 4 horas. Este es uno de los principales problemas que afectan la eficiencia de productividad.

Es evidente, entonces, que como consecuencia de las fallas que afectan el área de extrusión en época seca y las que seguramente ocurrirían en época lluviosa, las pérdidas de material son considerables.

Cuando ocurre una reducción de voltaje que hace que la maquinaria de extrusión deje de operar, puede tenerse pérdidas de hasta 25 libras de resina por máquina. Esto quiere decir que si en una baja de voltaje dejan de operar todas las extrusoras se puede llegar a tener una pérdida de 525 libras de materia prima. Los costos de resina son los siguientes:

Resina pura: Q 4.50/libra.

Resina reciclada: Q 3.30/libra.

La empresa utiliza resina reciclada, por lo que el costo total de pérdidas al año de material es:

$$CTP_a = C_{MP} \times MP \times n$$

Donde:

CTP_a = costo total de pérdidas anuales

C_{MP} = costo de materia prima (resina reciclada)

MP = materia prima perdida al año

n = número de veces que ocurrieron las fallas

Si se toma en cuenta que en años anteriores la empresa ha sufrido paros de producción por disturbios eléctricos hasta 10 veces al año, quiere decir que el costo total de pérdidas al año es, en promedio:

$$CTP_a = Q3.30/libra \times 525 \text{ libras} \times 10$$

$$CTP_a = Q 17,325.00$$

4.1.2 Costo de equipos dañados por los disturbios eléctricos

Los equipos que más se dañan cuando las reducciones de voltaje son muy constantes son los variadores de frecuencia que utilizan los controladores automáticos de cada máquina extrusora, debido a su sensibilidad a los cambios repentinos de voltaje suministrado.

La empresa ha tenido que cambiar hasta cuatro variadores de frecuencia anualmente debido a las fallas que se tienen. Cada controlador de las máquinas de extrusión tiene un variador diferente, dependiendo de la potencia del motor al cual le tiene que regular su velocidad para tener un mejor funcionamiento del mismo. De esta forma cuentan con variadores de frecuencia para potencias de 10 hp, 5 hp, 3hp y 1 hp, por mencionar unos. Estos variadores son trifásicos y para voltajes de 240 V.

En la tabla V se presentan los precios aproximados que tienen dichos variadores de frecuencia en el mercado.

Tabla V. Precios de variadores de frecuencia desde 1 hp hasta 10 hp

Potencia (hp)	Precio del variador de frecuencia
1	Q 2,250.00
2	Q 3,905.58
3	Q 5,263.94
4	Q 6,721.37
5	Q 8,302.64
6	Q 9,938.40
7	Q 11,589.85
8	Q 13,244.72
9	Q 14,900.19
10	Q 16,555.75

Con los datos anteriores puede hacerse una estimación del costo anual que tiene la empresa debido a daños a los variadores de frecuencia. Por ejemplo, el año pasado tuvieron que cambiar cuatro variadores en total, uno de 10 hp, dos de 5 hp y uno de 1 hp. Por lo tanto, el costo por pérdida de equipo el año pasado fue:

$$CTE_a = \sum C_{VF}$$

Donde:

CTE_a = costo total de equipo dañado anualmente

C_{VF} = costo del variador de frecuencia según su potencia

Entonces:

$$CTE_a = Q 16,555.75 + 2(Q 8,302.64) + Q 2250$$

$$CTE_a = Q 35,411.03$$

4.1.3 Costo del equipo de protección contra disturbios eléctricos

Los sistemas de *UPS* en línea son la mejor opción para proteger los equipos de control electrónicos que utilizan las máquinas extrusoras, en este caso los variadores de frecuencia.

La utilización de un sistema *UPS* ayuda a que los controladores no se desprogramen, ya que tienen una alimentación continua de potencia. Además, el sistema *UPS* regula el voltaje suministrado para obtener un mejor funcionamiento del controlador electrónico. Los motores cuentan con protecciones contra pérdidas de fase y contra altos o bajos voltajes, éstas también deben ser conectadas a la salida de las *UPS* para evitar que se dañen al momento de la falla.

A continuación se presenta la tabla VI que muestra los precios investigados, en dólares y en quetzales a un tipo de cambio de Q 7.65 por US\$ 1.00, de los sistemas *UPS* que pueden utilizarse para proteger los equipos sensibles que controlan el funcionamiento de los motores en el área de extrusión.

Tabla VI. **Precios de las UPS monofásicas para voltajes de 240 V**

UPS en línea monofásicos 208/240 VAC			
Capacidad (kVA)	Capacidad (kW)	Precio en dólares	Precio en quetzales
5	4,2	\$ 560,00	Q 4.284,00
6	5,1	\$ 685,00	Q 5.240,25
8	6,8	\$ 875,00	Q 6.693,75
10	8,5	\$ 1.000,00	Q 7.650,00
14	11,9	\$ 1.350,00	Q10.327,50

Para proteger los variadores se tiene que utilizar *UPS* que tengan un voltaje de entrada y salida de 240 V y de una potencia acorde a la que tienen los variadores. La empresa necesitaría equipos *UPS* de 6 kVA para los variadores que controlan los motores de 5 hp y 7.5 hp; y de 8 kVA y 14 kVA para los que controlan los motores de 10 hp y 15 hp, respectivamente.

Con los datos anteriores puede calcularse un costo total del sistema de protección de la manera siguiente:

$$CT_{sp} = \Sigma(N \times Q_{ups})$$

Donde:

CT_{sp} = costo total del sistema de protección *UPS*

N = cantidad de *UPS* necesarios

Q_{ups} = precio de la *UPS* según capacidad

Entonces:

$$CT_{sp} = (15 \times Q 5,240.25) + (4 \times Q 6,693.75) + (2 \times Q 10,327.50)$$

$$CT_{sp} = Q 126,033.75$$

Si se desea, también puede colocarse una *UPS* en línea que suministre energía a la máquina extrusora en todo momento. La *UPS* deberá ser trifásica y con la capacidad adecuada para cubrir la potencia total de la maquinaria; con voltaje de salida de 240 V.

Tomando en cuenta que las máquinas extrusoras consumen una potencia total de 150 kVA, se necesita que el equipo *UPS* tenga una capacidad de por lo menos 200 kVA. Esta opción resulta demasiado cara, ya que el equipo cuesta alrededor de US\$ 40,000.00, que sería equivalente a Q 306,000.00.

Para contrarrestar los picos de corriente provocados por el arranque del motor del compresor, la solución más económica es colocarle un arrancador estrella-delta, ya que, debido a la potencia que tiene el motor, colocarle un arrancador con autotransformador o uno electrónico no es aconsejable porque son muy costosos.

Un arrancador estrella-delta para un motor de 10 hp, con voltaje de 240 V tiene un valor de Q 2,650.00. Este arrancador viene en un gabinete para proteger los contactores y un temporizador que da la señal a los contactores para hacer el cambio de conexión.

Por lo tanto, el costo total de inversión para proteger el sistema vendría dado por el costo total del sistema de *UPS* más el costo del arrancador estrella-delta.

$$CT_{inv} = CT_{UPS} + C_{arr}$$

Donde:

CT_{inv} = costo total de inversión

CT_{UPS} = costo total del sistema de UPS

C_{arr} = costo del arrancador estrella-delta

Entonces:

$$CT_{inv} = Q 126,033.75 + Q 2,650.00$$

$$CT_{inv} = Q 128,683.75$$

Tomando en cuenta una protección completa de la maquinaria de extrusión, el costo total de inversión se incrementaría de la manera siguiente:

$$CT_{inv} = Q 128,683.75 + Q 306,000.00$$

$$CT_{inv} = Q 434,683.75$$

4.1.4 Ventaja económica de la adquisición de un sistema de protección para el área de extrusión

Con base en los costos anuales establecidos por las pérdidas en materia prima y los daños a los equipos de control (para cuyos cálculos se aplicó una tasa inflacionaria fija de 4.07% para cada año, que es la que se ha estimado al 31 de diciembre de 2006, publicada por el Banco de Guatemala) y el monto de la adquisición del equipo de protección contra disturbios eléctricos para los controladores electrónicos, puede decirse que la empresa podría reducir sus costos en un porcentaje considerable, después de recuperar la inversión en un plazo de 5 años.

En efecto, aun suponiendo conservadoramente una reducción de pérdidas del 25% en materia prima y del 95% en equipo, la disminución de costos sería del 72% anual a partir del quinto año. Esto se observa en las tablas VII y VIII siguientes:

Tabla VII. **Costos totales de pérdidas en un período de 5 años sin un sistema de UPS**

	Costo primer año	Acumulación Costos segundo año	Acumulación Costos tercer año	Acumulación Costos cuarto año	Acumulación Costos quinto año
Materia Prima	Q 17,325.00	Q 35,355.13	Q 54,119.08	Q 73,646.73	Q 93,969.15
Equipo dañado	Q 35,411.03	Q 72,263.29	Q 110,615.43	Q 150,528.51	Q 192,066.05
Total	Q 52,736.03	Q 107,618.42	Q 164,734.52	Q 224,175.24	Q 286,035.20

Tabla VIII. **Costos totales de pérdidas en un período de 5 años, con un sistema de UPS para los controladores electrónicos**

	Costo primer año	Acumulación Costos segundo año	Acumulación Costos tercer año	Acumulación Costos cuarto año	Acumulación Costos quinto año
Inversión	Q 128,683.75	Q 128,683.75	Q 128,683.75	Q 128,683.75	Q -
Materia Prima	Q 12,993.75	Q 26,516.35	Q 40,589.31	Q 55,235.05	Q 70,476.86
Equipo dañado	Q 1,770.55	Q 3,613.16	Q 5,530.77	Q 7,526.42	Q 9,603.29
Total	Q 143,448.05	Q 158,813.26	Q 174,803.83	Q 191,445.22	Q 80,080.16

En la tabla anterior puede apreciarse que la inversión se recupera antes del plazo de 5 años, ya que en el cuarto año la pérdida se reduce en un 15% ($1 - Q 191,445.22/Q 224,175.24$) y por lo tanto a partir del quinto año se tiene una reducción de costos considerable (72%).

En la tabla IX puede observarse los costos totales de pérdidas, en un período de 5 años, habiendo hecho una inversión para la protección total del área de extrusión. Considerando una reducción del costo de pérdida de materia prima y equipo dañado del 95%, puede concluirse que después de 5 años todavía no se ha podido recuperar la inversión.

Tabla IX. **Costos totales de pérdidas en un período de 5 años, con un sistema para la protección total del área de extrusión**

	Costo primer año	Acumulación Costos segundo año	Acumulación Costos tercer año	Acumulación Costos cuarto año	Acumulación Costos quinto año
Inversión	Q 434,683.75	Q 434,683.75	Q 434,683.75	Q 434,683.75	Q 434,683.75
Materia Prima	Q 866.25	Q 1,767.76	Q 2,705.95	Q 3,682.34	Q 4,698.46
Equipo dañado	Q 1,770.55	Q 3,613.16	Q 5,530.77	Q 7,526.42	Q 9,603.29
Total	Q 437,320.55	Q 440,064.67	Q 442,920.47	Q 445,892.51	Q 448,985.50

En la tabla X se presenta una comparación de los costos totales acumulados durante 5 años de cuando no se ha hecho la inversión, al hacer una inversión de un sistema que proteja los controladores electrónicos y al hacer una inversión de un sistema que proteja en su totalidad el área de extrusión de plástico.

Tabla X. **Datos consolidados de las tres últimas tablas precedentes**

	Costo primer año	Acumulación Costos segundo año	Acumulación Costos tercer año	Acumulación Costos cuarto año	Acumulación Costos quinto año
Costo total sin inversión	Q 52,736.03	Q 107,618.42	Q 164,734.52	Q 224,175.24	Q 286,035.20
Costo total con protección a controladores	Q 143,448.05	Q 158,813.26	Q 174,803.83	Q 191,445.22	Q 80,080.16
Costo con protección total	Q 437,320.55	Q 440,064.67	Q 442,920.47	Q 445,892.51	Q 448,985.50

CONCLUSIONES

1. En una empresa donde su proceso de producción es continuo, los problemas con el suministro de energía eléctrica son un factor crítico para su economía, ya que una falla provocada por un disturbio eléctrico puede provocar pérdida con un costo alto. En este caso, las fallas se producen por microcortes originados por transitorios de origen externo a la red (árboles, animales, choques de carros, etc.) y descargas electroatmosféricas en menor cantidad.
2. Debido a que la empresa cuenta con equipo electrónico sensible que controla la velocidad de los motores de las máquinas extrusoras, y el proceso de producción es continuo, al ocurrir fallas constantes, el equipo se deteriora y se reduce su vida útil o se daña completamente.
3. La mayor cantidad de fallas que afectan las instalaciones de la empresa se deben a reducciones de voltaje producidos por cortocircuitos fuera de la empresa, las cuales pueden ser temporales o permanentes. El origen de estas fallas puede ser por descargas atmosféricas o debido a vegetación o animales que entren en contacto con las líneas de distribución provocando cortocircuitos.
4. Los arranques de motores de inducción también pueden producir picos de corriente y reducir el voltaje a un porcentaje muy por debajo del permitido por el equipo electrónico, y éste manda una señal para detener la maquinaria. Sin embargo, en este caso la inexistencia de motores grandes (por arriba de 25 hp) no tiene mayor incidencia.

5. Una solución factible, pero onerosa, para minimizar los costos de pérdida, es un sistema de *UPS* que proteja en su totalidad las máquinas extrusoras, las cuales podrán operar cierto tiempo manteniéndoles un suministro de energía ininterrumpible durante el período que ocurre la falla; éste puede ser desde milésimas de segundos hasta unos minutos.
6. La solución más económica para minimizar el tiempo de paro de las máquinas extrusoras es conectar *UPS* en línea solamente a los controladores; de esta forma también se protegen de bajos y altos voltajes transitorios que puedan dañar las tarjetas electrónicas que son de alto costo.
7. Pudo determinarse que realizando la inversión en un sistema de protección contra disturbios eléctricos y utilizándolo solamente para los controladores, ésta logra recuperarse en un lapso no mayor de cinco años, ya que el porcentaje de costo de pérdidas se reduce en un 72% anual.
8. Un sistema de protección total para la maquinaria extrusora significa una inversión muy costosa, la cual no logrará recuperarse sino hasta transcurridos más de cinco años.

RECOMENDACIONES

1. Toda industria que realice procesos continuos de producción debe tener protecciones para los equipos electrónicos que controlan el proceso, para lograr minimizar las pérdidas económicas de materiales y equipo. Para ello se recomienda realizar este tipo de estudios para determinar la mejor opción de protección dependiendo del volumen de pérdidas que tiene y el costo anual que generan.
2. Los tipos de fuentes de energía ininterrumpida (*UPS*) más recomendables son los que se conectan en línea a la red eléctrica de la empresa, ya que de esta manera sí la potencia en AC falla, la *UPS* sigue suministrándola a la carga.
3. Si la industria, además de tener microcortes de energía, sufre constantemente de picos de voltaje se recomienda utilizar los Sistemas Supresores de Transientes de Voltaje (*TVSS*, por sus siglas en inglés *Transient Voltage Surge Suppressor*), los cuales son instalados en la acometida después del interruptor principal ofreciendo una excelente protección a las instalaciones contra las sobretensiones dañinas que pueden ser originadas por rayos, irregularidades del suministro eléctrico y picos de voltaje en general, que pueden dañar al equipo electrónico sensible.
4. Si los cortes de energía eléctrica son demasiado constantes, es aconsejable realizar una queja formal a la Distribuidora de energía eléctrica, según los reglamentos de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, para que aquélla realice un estudio de la línea de distribución y dé una solución al problema.

5. Se sugiere que por parte de la industria se conozca el circuito eléctrico de alimentación donde se encuentra ubicada la empresa, para poder detectar con antelación posibles problemas con el suministro de energía, por ejemplo árboles, accidentes automovilísticos, etc.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aller, José Manuel. **Conversión de energía eléctrica.** Venezuela: Universidad Simón Bolívar. 1992
2. Chapman, Stephen J. **Máquinas Eléctricas.** 1ª. ed. México: Editorial McGraw-Hill Latinoamérica, S.A. 1989
3. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Normas técnicas del servicio de distribución.** Guatemala: s.e. 1999
4. Delgado Rosas, Eduardo. **La bolsa plástica, el comodín de los empaques.** Mecánica Tecnomaq. (México) 2005
5. **Descripción del proceso (películas de PVC).** Empaques plásticos de México, S.A. de C.V. (México) (5) 2005
6. Dugan, Roger C. y otros. **Electrical power system quality.** Estados Unidos de América: Editorial McGraw-Hill. 1996
7. Echeverría Echeverría, Carlos Bladimir. **Reducción de corrientes de arranque en motores eléctricos y su aplicación en el ahorro de energía en una planta destiladora de alcohol.** Tesis Ing. Mec. Elec. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2005
8. Empresa Eléctrica de Guatemala. **Aplicaciones de conexiones de transformadores.** Guatemala: s.e. s.a.

9. Empresa Eléctrica de Guatemala. **Normas para acometidas de servicio eléctrico.** 12ª. ed. Guatemala: s.e. 1998
10. Fink, Donald G. y H. Wayne Beaty. **Manual de ingeniería eléctrica.** 13a. ed. México: Editorial McGraw-Hill. 1996
11. Greenwood, Allen. **Electrical transient in power systems.** Estados Unidos de América: s.e. s.a.
12. Lazar, Irwin. **Análisis y diseño de sistemas eléctricos para plantas industriales.** 1ª. ed. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V. 1988
13. **Power quality.** Hubbell Wiring Devices. Estados Unidos de América: s.e. s.a.

APÉNDICE

CÁLCULO DEL VALOR PRESENTE NETO INCREMENTAL (VPNI)

El valor presente neto incremental (VPNI) es muy utilizado cuando hay dos o más opciones de proyectos excluyentes y en las cuales solo se conocen los gastos. En esos casos se justifican los incrementos en la inversión si estos son menores que el valor presente de la diferencia de los gastos posteriores.

Para calcular el VPNI se deben realizar los pasos siguientes:

1. Se deben colocar las opciones en orden ascendente de inversión.
2. Se sacan las diferencias entre la primera opción y la siguiente.
3. Si el VPNI es menor que cero, entonces la primera opción es la mejor; de lo contrario, la segunda es la que debe escogerse.
4. La mejor de las dos se compara con la siguiente hasta terminar con todas las opciones.
5. Se deben tomar como base de análisis el mismo periodo de tiempo.

Para efectuar el cálculo del VPNI se aplica la fórmula siguiente:

$$VPNI = - \left[DI + \sum_n^1 CA_n (1+i)^{-n} \right]$$

Donde:

VPNI = valor presente neto incremental

DI = diferencia del costo de las inversiones

CA = costo por pérdidas anuales

i = tasa de interés de mercado

n = número de años

Al evaluar los proyectos es recomendable utilizar una tasa de interés mayor a la tasa de interés activa bancaria con el fin de tener un margen de seguridad y, de esta manera, cubrir ciertos riesgos, tales como liquidez, efectos inflacionarios o desviaciones que no se tengan previstas.

Con el propósito de corroborar lo aseverado en el subíndice 4.1.4 del capítulo 4, se ha elaborado la tabla XI con los datos básicos para calcular el valor presente neto incremental (VPNI) partiendo de las dos opciones presentadas, una como A que plantea una inversión en la instalación de un sistema de *UPS* para los controladores electrónicos y otra como B que consiste en invertir en otro sistema de *UPS* para la protección total del área de extrusión de plástico.

Tabla XI. Datos básicos para calcular el VPNI

	A	B	B-A
Costos de inversión	Q 128,683.75	Q 434,683.75	Q 306,000.00
Costo por pérdidas, año 1	Q 14,764.30	Q 2,636.80	Q (12,127.50)
Costo por pérdidas, año 2	Q 15,365.21	Q 2,744.12	Q (12,621.09)
Costo por pérdidas, año 3	Q 15,990.57	Q 2,855.80	Q (13,134.77)
Costo por pérdidas, año 4	Q 16,641.39	Q 2,972.03	Q (13,669.35)
Costo por pérdidas, año 5	Q 17,318.69	Q 3,093.00	Q (14,225.70)

Al resolver la ecuación correspondiente, aplicando una tasa de interés activa bancaria de 15% (tomando como referencia el promedio ponderado de 13.95%, al 24 de agosto de 2006, publicado por el Banco de Guatemala) se llega al resultado siguiente:

$$VPNI = -[306,000 - 12,127.50(1 + 0.15)^{-1} - 12,621.09(1 + 0.15)^{-2} - 13,134.77(1 + 0.15)^{-3} - 13,669.35(1 + 0.15)^{-3} - 14,225.70(1 + 0.15)^{-5}]$$

$$VPNI = -262,386.49$$

Con este resultado, por ser menor que cero, queda demostrado que la opción A es la más recomendable para el empresa Aristoplast.

ANEXO 1

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE FUENTES DE ENERGÍA ININTERRUMPIDA

UPS Toshiba (Serie 1600)					
Capacidad	3.6 kVA	6 kVA	8 kVA	10 kVA	14 kVA
Topología	UPS en línea, doble conversión, corrector del factor de potencia de entrada, y transformador interno de aislamiento				
Características de entrada					
Voltaje	Monofásico 208/240 VAC (3 cables de entrada/ L-L, T), 230 VAC (3 cables de entrada / L, N, T), + 10% - 30%				
Frecuencia	45 - 65 Hz				
Factor de potencia	> 0.95 para todas las cargas				
Corriente de tercera armónica	< 5% (Incluso para el 100% de cargas no lineales)				
Características de las baterías					
Tipo de batería	Ácido de plomo con válvula regulada, con retardante de llama (9.0 Amp)				
Tiempo de reserva, totalmente cargada y con factor de potencia de 0.85 (25 °C)	14 minutos	7 minutos	7 minutos	5 minutos	7 minutos
	Aproximadamente 30% más tiempo con un factor de potencia de 0.7 (el triple del tiempo de reserva con la mitad de la carga)				
Tiempo de recarga	24 hrs. (completa), 12 hrs (90%)				
Características de Salida					
Voltaje	Monofásico 208/240 VAC (4 cables de entrada/ L-L, N, T), 230 VAC (3 cables de entrada / L, N, T)				
Regulación de Voltaje	Máximo de +/- 3%, normalmente de +/- 1%				
Frecuencia	50/60 Hz				
F.P. de la carga	0.85				
Eficiencia (AC-DC-AC)	> 85%				
Corriente	15 A	25 A	33.3 A	42 A	48 A
Pico máximo de corriente	45 A	75 A	100 A	126 A	174 A
Capacidad de sobrecarga	150 % por 10 seg / 125 % por 10 min / 1000% por un ciclo				

ANEXO 2

SISTEMA SUPRESOR DE TRANSIENTES DE VOLTAJE

La solución para el problema que generan los transitorios es un supresor de transitorios o *TVSS* por su siglas en inglés (*Transient Voltage Surge Supressor*) el cual deriva a tierra el exceso de energía protegiendo el equipo. Cuando están debidamente instalados, por ejemplo en la entrada de servicio a la instalación, los supresores cumplen una función muy importante en la protección de equipo sensible.

La mejor manera de proteger el equipo eléctrico de sobrevoltajes es instalando supresores de transitorios estratégicamente a través del establecimiento a proteger. Considerando que los sobrevoltajes se pueden originar tanto externa como internamente, los supresores deben ser instalados para proveer protección máxima sin importar la ubicación de la fuente. Por esta razón, se utiliza el método de “zona de protección”.

El primer nivel de defensa se obtiene instalando un supresor en la entrada principal de energía (tablero principal). Con esto se busca protección contra transitorios originados externamente. Sin embargo, el supresor instalado en la entrada de servicio no protegerá contra transitorios generados internamente, de modo que deben instalarse supresores en todos los tableros de distribución (tableros secundarios) que alimenten equipo sensible. De igual manera, una tercera zona de protección deberá ser creada instalando supresores “locales” en cada equipo que se desea proteger. Cada zona de protección contribuye a la protección total, así como ayuda a reducir el voltaje expuesto al equipo protegido.

El supresor de entrada de servicio (primer nivel de protección) provee la primera línea de defensa contra transitorios eléctricos al derivar a tierra grandes picos de energía. También reduce el nivel de energía del transitorio que entra a la instalación a un nivel que pueda ser manejado por los dispositivos descendientes (segundo nivel de protección) más cercanos a la carga (equipo a proteger). Por lo tanto, la adecuada coordinación de supresores es necesaria para evitar dañar supresores instalados en tableros secundarios o los que se instalan en el equipo por proteger.

Si la coordinación no se realiza, el exceso de energía que se propague puede dañar los supresores instalados de las zonas 2 y 3 y destruir el equipo que se está tratando de proteger.

Cuando se requiere instalar un supresor para una aplicación dada, hay varias consideraciones que deben hacerse: aplicación, voltaje y configuración del sistema, voltaje de cebado, corriente pico e instalación. Las categorías de los supresores se establecen dependiendo de la zona que protegerá así:

Tabla XII. **Categorías y niveles de explosión de supresores de transitorios**

		Categoría		
		C	B	A
Nivel de Exposición	Alto	C3	B3	A3
	Medio	C2	B2	A2
	Bajo	C1	B1	A1

Fuente: ERICO. **Critec Surge Protection Products. Pág. 2**

La categoría "C" se refiere al servicio eléctrico de entrada a la instalación eléctrica (tablero principal); la categoría "B", a los tableros de distribución secundarios; y la categoría "A", a los tomacorrientes de los cuales se alimentan directamente las cargas.

Cuando existe actividad transitoria externa se considera que el nivel de exposición es alto. Esto se da en ambientes comerciales y/o industriales con altos incidentes, en cantidad y amplitud, de rayos, transitorios provenientes de la empresa eléctrica y fluctuaciones transitorias generadas por el consumo.

Si existe actividad transitoria interna abundante se considera que el nivel de exposición es medio. Ello ocurre en ambientes comerciales livianos o residenciales pesados con altos incidentes, en cantidad y amplitud, de rayos y transitorios provenientes de la empresa eléctrica.

Al haber actividad transitoria interna moderada se considera que el nivel de exposición es bajo. Lo anterior sucede en ambientes residenciales con poca exposición a grandes sobrevoltajes, tales como rayos, fluctuaciones transitorias de la empresa eléctrica y fluctuaciones transitorias generadas por un gran consumo en la demanda de corriente.