

REVISTA

SODEBRAS

SOLUÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO PAÍS

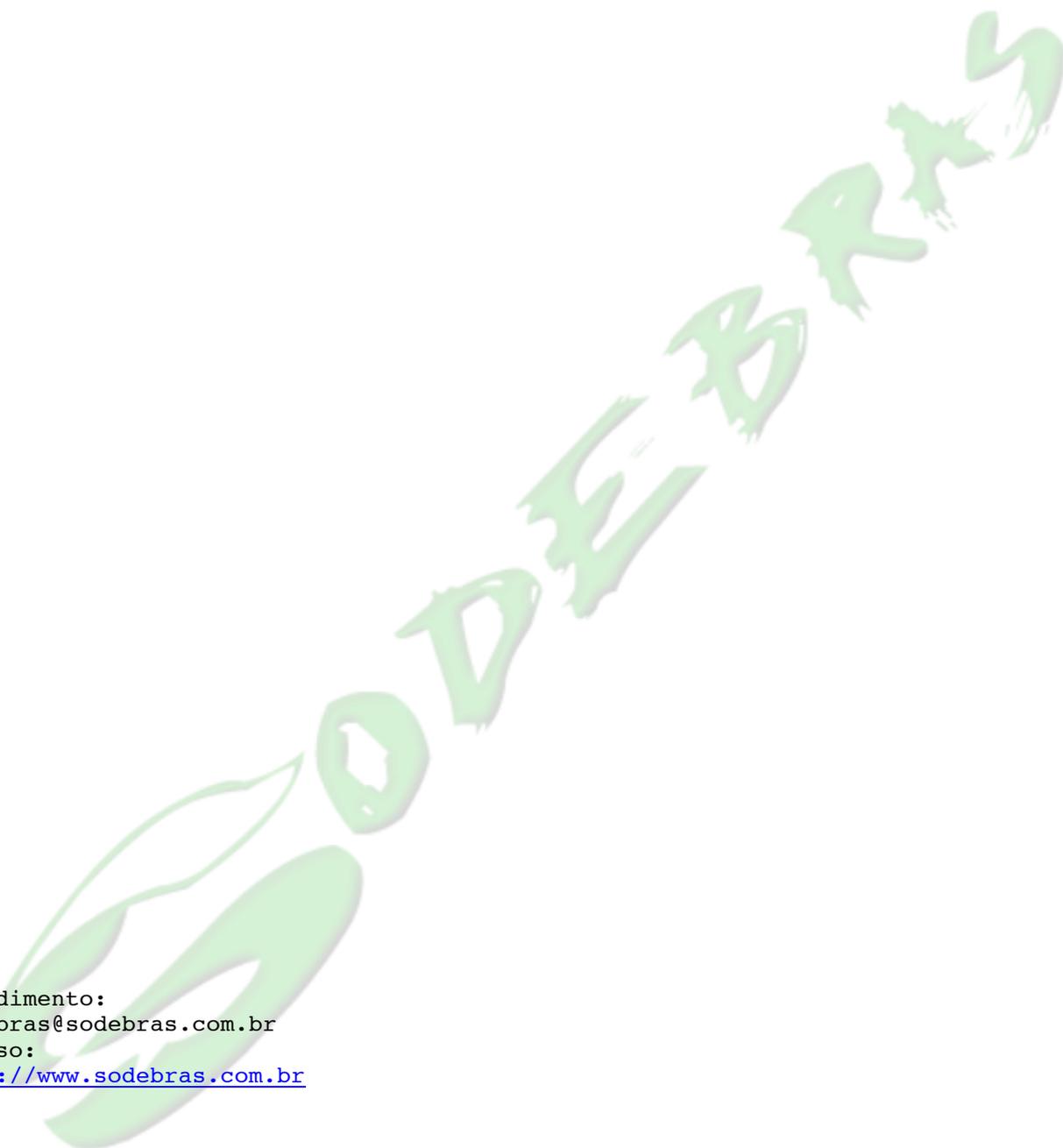
VOLUME 7 - Nº 75 – Março / 2012
ISSN - 1809-3957

ARTIGOS PUBLICADOS

PUBLICAÇÃO MENSAL
Nesta edição

ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGIA DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS. SU IMPACTO EN LAS REDES ELÉCTRICAS - Carlos G. Pacheco, Adrián D'Andrea, Jorge A. Caminos, Julio Doyharzabal 03

DISMINUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE - A. Boucíguez, M. Morales, M. Vilte, Y R. Lozano 10



Atendimento:
sodebras@sodebras.com.br
Acesso:
<http://www.sodebras.com.br>



ESTUDIO DE LA CALIDAD DE ENERGIA DE LAS LÁMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS. SU IMPACTO EN LAS REDES ELÉCTRICAS

ISSN 1809-3957

ING. CARLOS G. PACHECO, ING. ADRIÁN D'ANDREA, ING. JORGE A. CAMINOS, ING. JULIO DOYHARZABAL

Resumen - Dos décadas atrás, los armónicos eran poco comunes en las redes de distribución. En la actualidad esto no es así, por un lado debido al aumento de equipos electrónicos y de cargas no lineales, y por otro lado, por el masivo recambio de lámparas incandescente (de filamento) por LFC (lámparas fluorescentes compactas). Esto nos motiva a estudiar los efectos que producirán en el funcionamiento de los transformadores de distribución y las líneas eléctricas.

El trabajo contiene un informe de los parámetros eléctricos que presentan los distintos tipos de lámparas fluorescentes compactas como así también su comportamiento según las especificaciones brindadas por los distintos fabricantes o importadores.

También se muestra el impacto tanto energético, como de calidad de energía, que produce el reemplazo total o parcial de las mencionadas lámparas bajo consumo en una vivienda tipo.

Una de las conclusiones que arrojaron los ensayos fue que la distorsión armónica no es constante con el aumento de la cantidad de lámparas conectadas. Para ello se realizaron en laboratorio mediciones de calidad de energía con aumento progresivo de LFC conectadas.

Debido al impedimento de contar con un gran número de LFC que sea representativo frente a la potencia de un transformador de distribución se modeló el ensayo realizado mediante software y de esta forma confirmar las tendencias registradas en laboratorio debido a la incorporación masiva de LFC en una red.

Abstract - Two decades ago, the harmonics were rare in distribution networks. At present this is not so, firstly because of the increased electronic and nonlinear loads, and secondly, by the massive replacement of incandescent lamps (filament) by LFC (compact fluorescent lamps). This motivates us to study the effects produced in the operation of distribution transformers and power lines.

The paper contains a report of electrical parameters that have different types of compact fluorescent lamps as well as their performance according to specifications provided by different manufacturers or importers.

It also shows the impact of both energy and power quality, producing total or partial replacement of the aforementioned low power lamps in a model home.

One conclusion that threw the trials was that the harmonic distortion is not consistent with the increase in the number of lamps connected. To this end were conducted in laboratory measurements of power quality with progressive increase of LFC connected.

Due to the impediment of having a large number of LFC to be representative compared to the power of a distribution

transformer is modeled using the trial software and thus confirm the trends in laboratory because of the massive incorporation of LFC in a network.

Palabras Claves: LFC, eficiencia energética, calidad de energía, impacto energético.

I. NOMENCLATURAS

LFC : lámpara fluorescente compacta

THD: distorsión armónica total

THD_i: distorsión armónica total corriente

THD_v: distorsión armónica total tensión

II. INTRODUCCION

Hasta hace menos de dos décadas la aparición de armónicos en redes de distribución no era lo mas común, limitándose a las zonas industriales o de oficinas principalmente. Pero con el corriente crecimiento de los equipos que poseen electrónica (y cargas no lineales) esto se hizo mucho más común en todos los ámbitos.

El efecto de una o más fuentes de armónicos sobre las redes, dependerá principalmente de la característica de respuesta de frecuencia del sistema.

La mayoría de las industrias se ven afectadas por los armónicos que se producen a través de los equipos que representan cargas no lineales para el sistema eléctrico en general.

La lámpara compacta fluorescente o LFC es un tipo de lámpara fluorescente que se puede usar con casquillos estándar. En comparación con las lámparas incandescentes, las LFCs tienen una vida nominal mayor y usan menos energía eléctrica para producir la misma iluminación.

Presentadas mundialmente a principios de los años ochenta, las ventas de las lámparas LFCs se han incrementado constantemente debido a las mejoras en su funcionamiento y la reducción de sus precios. El más importante avance en la tecnología de las lámparas fluorescentes (incluidas las LFCs) ha sido el reemplazo de los balastos magnéticos por los del tipo electrónico. Este reemplazo ha permitido la eliminación del efecto de "parpadeo" y del lento encendido tradicionalmente asociados a la iluminación fluorescente.

III. MEDICIONES REALIZADAS

A. Lámparas conectadas a red monofásica

Para realizar las mediciones primeramente se consiguieron lámparas de variadas marcas y calidad, para luego

conectarlas a la red, y medir los distintos parámetros de estas; por medio de un equipo analizador de parámetros eléctricos marca FLUKE modelo 435 equipado con pinzas amperométricas modelo i5s, para poder medir las débiles corrientes que circulan en una lámpara de bajo consumo. En la figura 1 podemos observar la forma de onda de corriente tipo de una lámpara de bajo consumo con balasto electrónico. Cabe aclarar que no poseen filtros para los armónicos. Mientras que en la tabla I se presenta un resumen de los principales parámetros medidos en las distintas LFCs.

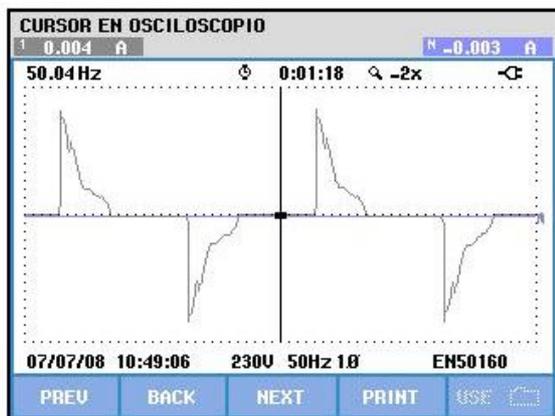


Figura N° 1: Forma de onda de corriente de una LFC

Tabla I
Resumen de valores medidos

LAMPARA	Potencia Activa [W]	Factor de Potencia	THD _i [%]
ALIC 20W	17.3	0.60	109.11
GE CALIDA 20W	17.6	0.62	103.91
GE FRIA 20W	17.6	0.62	106.09
HIGH GLOW 20W	15.0	0.57	121.00
MP FRIA 20W	15.7	0.59	111.79
PHILIPS FRIA 20W	17.2	0.60	113.87
PHILIPS CALIDA 20W	18	0.59	113.71
SICA CALIDA 20W	17.8	0.58	122.19
SYLVANIA 20 W	18.36	0.56	130.76
OSRAM 20 W	16.7	0.58	119.77
LEELITE 18W	17.2	0.61	107.11
PHILIPS FRIA 18W	17.7	0.61	107.83

Lo que más resalta de los valores medidos es el elevado factor de distorsión armónica de corriente. En la figura 2 se representa un histograma tipo de una de las lámparas con el espectro de frecuencia de los armónicos de corriente. Se pudieron detectar ciertas características de los valores medidos de THD_i:

- Todas las lámparas analizadas están entre la franja de 100 y 140 %.
- Este factor se mantiene dentro de valores acotados para todas las lámparas ensayadas.
- El valor de este factor no tiene que ver con la marca o calidad de la lámpara, si no con la tecnología del balasto electrónico que no posee filtros.

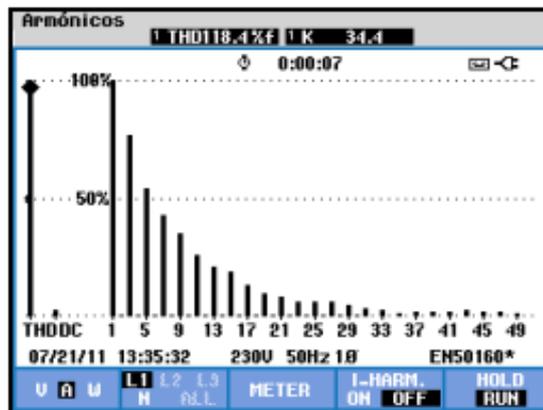


Figura N° 2: Espectro de frecuencia de los armónicos de corriente de una LFC

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de los valores de la distorsión armónica total de corriente (THD_i) en la red, a medida que se va aumentando el número de lámparas fluorescentes compactas conectadas, se realizaron mediciones de a grupos de 10 hasta llegar a 150. La distorsión armónica de corriente presenta en general una tendencia de decrecimiento a medida que aumenta el número de lámparas conectadas a la red. El THD_i descendió de 118 % (para 10 lámparas) hasta 104 % (para 150 lámparas). (Fig. 3)

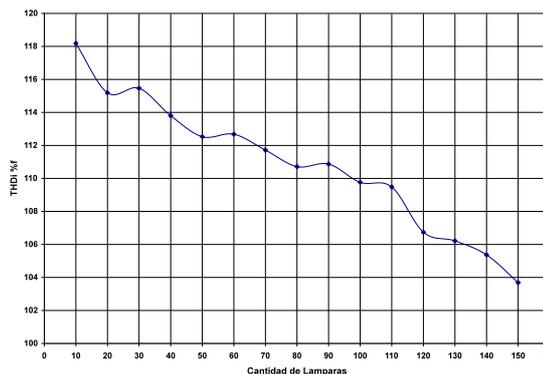


Figura N° 3: Distorsión armónica en función de la cantidad de lámparas conectadas

Aun con esta cantidad de lámparas, no se puede determinar a simple vista si los valores de THD_i comenzarán a estabilizarse o continuaran descendiendo con el agregado de más lámparas a la red. La figura 4 permite ver que los armónicos de orden 3 y 5 (los de mayor presencia) se mantienen prácticamente estables a medida que se aumenta el número de lámparas conectadas. Los armónicos de orden superior (del 7° en adelante) decrecen en amplitud a medida que aumenta el número de lámparas conectadas a la red. Prácticamente, dicho decrecimiento es mas acentuado mientras mayor sea el orden del armónico. En tanto que la componente de continua descende bruscamente a partir de las 20 lámparas en adelante hasta llegar a un 6 % de la fundamental.

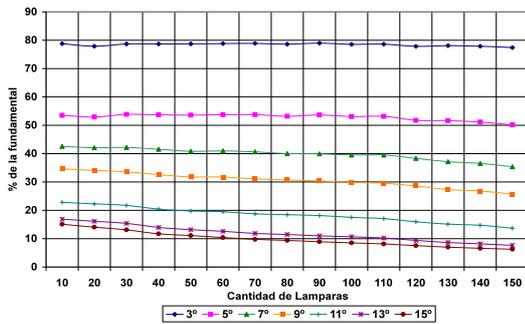


Figura N° 4: Armónicos de corriente

B. Lámparas conectadas a una red trifásica con neutro

Se conectaron a una red trifásica con neutro 50 LFCs en cada fase, obteniéndose valores de distorsión similares a los monofásicos. La diferencia fundamental se da en la corriente del neutro que se ve afectada por la circulación de los armónicos de secuencia homopolar, provocando que su valor sea mayor que las corrientes de fase. En este caso la corriente de neutro es de 12 A mayores a los 7 A que circulan por cada una de las fases. Valores similares a algunos trabajos de las referencias [2], [3] y [4]. (Fig. 5).

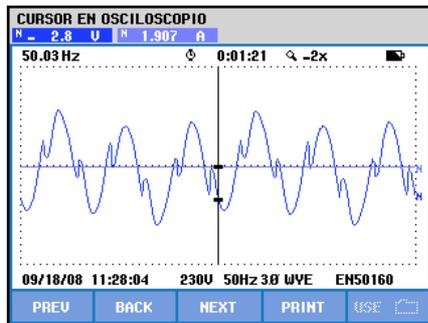


Figura N° 5: Forma de onda de corriente de neutro en red trifásica

Conclusión de las mediciones

- Alta distorsión de la onda de corriente (THD_i superior al 100% en todos los casos).
- Parámetros medidos no corresponden con los indicados por el fabricante, por ejemplo en la potencia.
- A medida que se va aumentando el número de lámparas conectadas a una red, la distorsión armónica total de corriente desciende. Debido a varias razones: las lámparas no son exactamente iguales, por lo que algunos armónicos se van compensando y la componente continua disminuye su valor. Aunque no pudimos llegar al punto de estabilización, podemos asegurar que llegara, ya que los armónicos de orden 3 y 5, que son los de mayor importancia, mantienen prácticamente sus valores constantes.
- Es importante la presencia de armónicos de secuencia homopolar. Para una red trifásica que alimenta a una carga equilibrada formada solo por lámparas fluorescentes compactas, la corriente de neutro es considerablemente superior a la corriente de línea.

C. Impacto de las LFC en una instalación eléctrica hogareña

Para este estudio, se instalaron las lámparas en una vivienda conjuntamente con los consumos usados normalmente y se fue variando el porcentaje de LFCs instaladas.

La vivienda en cuestión tiene ocho bocas para iluminación de uso general, se tomó a este número como el 100% de puntos donde se instalarían las LFCs; también se tienen consumos clásicos e indispensables en un inmueble, como ser heladera, televisor, computadoras, etc.

Las distintas mediciones se detallan a continuación, mostrando distintas figuras, valores y las respectivas conclusiones.

1) Primera medición

En este caso se instalaron como carga total del inmueble, ocho lámparas de bajo consumo con una potencia nominal de 20 W cada una; podemos observar en la figura 6, la forma de onda.

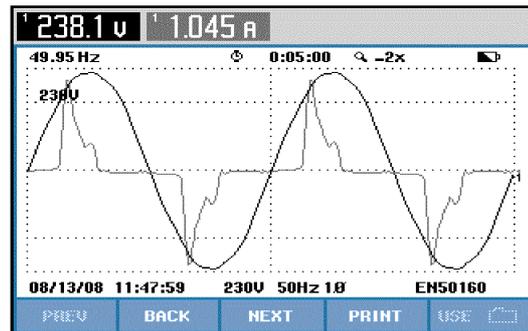


Figura N° 6: Forma de onda de corriente y tensión

Promedios

Tensión: 238,42[V]
 Corriente: 1,06[A]
 Potencia Activa: 160,62[W]
 Potencia Reactiva: 196,13[VAr]
 THDI: 102,23 %
 THDU: 2,14%
 FP: 0,63
 Cos φ: 0,91

La potencia activa promedio de 160 W durante el tiempo que duró la medición, el factor de distorsión armónico de corriente estuvo en promedio en el 102% y el factor de potencia estuvo en 0,63.

2) Segunda medición

En esta medición se sacaron dos lámparas de bajo consumo y se colocaron dos lámparas de 100 W incandescentes, siendo solamente estas el consumo total de la casa se obtuvieron los siguientes resultados: la potencia activa promedio medida fue de 338 W, el factor de distorsión disminuyó a un valor mucho más pequeño, acercándose al 37 % de promedio mientras que el factor de potencia promedio elevó su valor a 0,92. (Fig. 7).

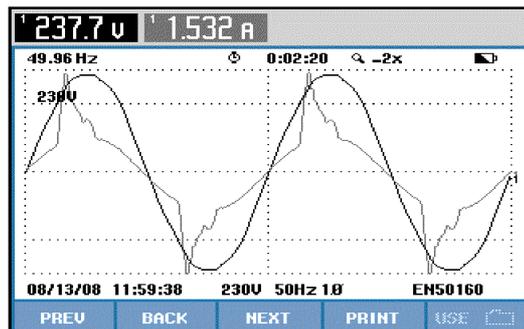


Figura N° 7: Forma de onda de corriente y tensión

Promedio

Tensión: 238,97[V]
 Corriente: 1,53[A]
 Potencia Activa: 337,56[W]
 Potencia Reactiva: 42,25[VAr]
 THDI: 37,39 %
 THDU: 2,18%
 FP: 0,92
 Cos φ: 0,98

3) Tercera medición

En esta tercera medición se sacaron 2 LFCs más, y se agregaron otras dos lámparas incandescentes de 100 W cada una, se pudo ver que la potencia activa se situó en los 538 W mientras que el factor de distorsión THDi disminuyó al 15 %, con un factor de potencia 0,98. (Fig. (8)).

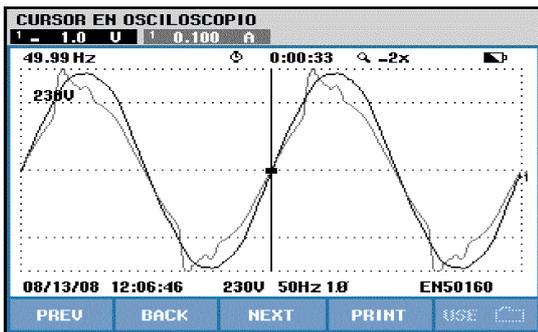


Figura N° 8: Forma de onda de corriente y tensión

Promedio

Tensión: 240,03[V]
 Corriente: 2,28[A]
 Potencia Activa: 538,25[W]
 Potencia Reactiva: 95,03[VAr]
 THDI: 15,12 %
 THDU: 2,21%
 FP: 0,98
 Cos φ: 1

4) Cuarta medición

En esta medición se desconectaron dos LFC más, y conectaron dos lámparas incandescentes de 100 [W] cada una. Como es de esperar, subió el consumo teniendo un promedio de 719 [W] de potencia activa, un THDi de 5% y el factor de potencia igual a 1. Vemos que la calidad de potencia ha mejorado respecto a las primeras mediciones, por la gran influencia de las lámparas incandescentes. El consumo se ha incrementado 4,5 veces con respecto a la primera medición (donde se usan todas LFCs).

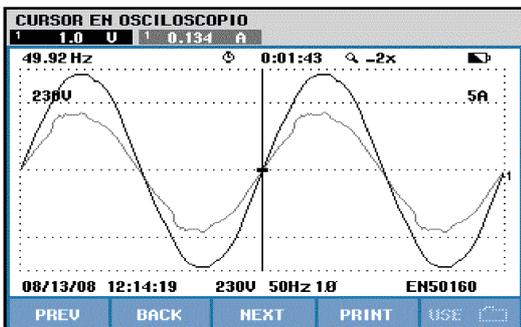


Figura N° 9: Forma de onda de corriente y tensión

Promedio

Tensión: 235,44[V]

Volume 7 – n. 75 – Marzo/2012

Corriente: 3,06[A]
 Potencia Activa: 718,18[W]
 Potencia Reactiva: 50,72[VAr]
 THDI: 5,17 %
 THDU: 2,25%
 FP: 1
 Cos φ: 1

5) Quinta medición

En este caso solamente se conectaron lámparas incandescentes. Se puede notar que las ondas de tensión y corriente responden a una función senoidal pura, característica de aplicar una carga resistiva. Vemos también que la potencia consumida para iluminar con lámparas incandescentes a la misma relación que con LFCs es 5,75 veces mayor aproximadamente, según los datos obtenidos en las mediciones.

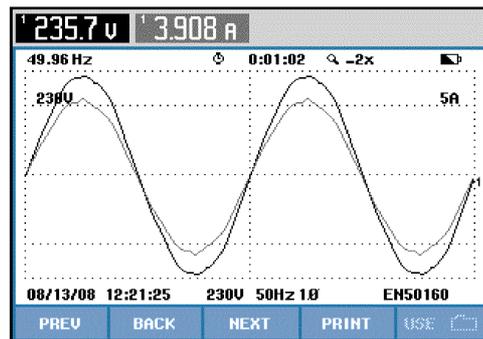


Figura N° 10: Forma de onda de corriente y tensión

Promedio

Tensión: 235,75 [V]
 Corriente: 3,90 [A]
 Potencia Activa: 918,88 [W]
 Potencia Reactiva: 27,75 [VAr]
 THDI: 2,11 %
 THDU: 2,17%
 FP: 1
 Cos φ: 1

6) Sexta medición

En este caso medimos los parámetros del circuito de la vivienda en cuestión, compuesto de la siguiente manera: 8 LFCs, una heladera, un televisor y una computadora. Podemos observar en la figura 11, que la onda de corriente se ve muy deformada, esto se debe a las fuentes electrónicas que poseen para su alimentación las computadoras y televisores, sumado a las lámparas de bajo consumo.

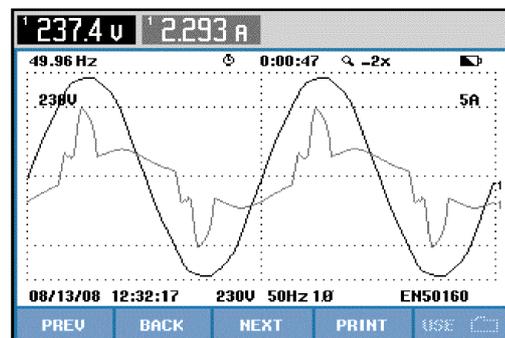


Figura N° 11: Forma de onda de corriente y tensión

Promedio

Tensión: 237,68 [V]
 Corriente: 2,26 [A]
 Potencia Activa: 415,16 [W]

Potencia Reactiva: 339,83 [VAr]
 THDI: 50,96 %
 THDU: 2,44%
 FP: 0,77
 Cos φ: 0,87

Conclusiones mediciones en una vivienda.

En vistas al ensayo realizado, destacamos las siguientes conclusiones:

-Cuando se reemplazaron las lámparas incandescentes por LFCs, se produjo una desconexión de cargas lineales, las que son reemplazadas por cargas alineales de características luminotécnicas similares pero de una potencia mucho menor (5 veces); por lo que si bien la potencia disminuye se inyecta una gran cantidad de armónicos en la red.

Este efecto presenta un apreciable beneficio para las redes, ya que la disminución de la corriente se produce sobretodo en las horas del pico de consumo en la noche, permitiendo de esta forma un mejor aprovechamiento de la potencia instalada y evitar así la ampliación del sistema.

-Teniendo un consumo normal en una casa, con un TV, una PC, lámparas fluorescentes compactas y una heladera, los valores de THDi se atenúan respecto al de las LFC solas, pero su valor aun se considera elevado. Con una gran cantidad de armónicos circulantes por la red, principalmente los armónicos 3°, 5°, 7°, 9°, 15° y superiores.

D. LFCs Conectadas en un trazo de pequeña potencia

Una vez analizados los efectos que provoca la instalación de lámparas fluorescentes compactas en una residencia y luego de destacar ciertas conclusiones se planteó la idea de conectar un transformador de potencia y poder conectarle una gran variedad de cargas, ya sea con solo lámparas de bajo consumo en sus fases o LFCs y resistencias, carga no repartida uniformemente, etc. Con este nuevo planteo se pretendió analizar el impacto que este tipo de cargas provoca en los distintos parámetros del trazo, como ser deformación de la onda de tensión (THDu), variación de frecuencia, cancelación de armónicos, etc.

Al transformador se lo conectó en triangulo-estrella para reproducir de alguna manera a los transformadores de distribución ubicados en las subestaciones aéreas y poder tener una idea de que pasa con los armónicos, corriente de neutro, formas de onda, etc.

Por ejemplo, como se ve en la figura 12, conectando una carga que presente un gran contenido armónico en una de las fases (45 LFCs), la corriente presenta dos picos y se destaca un THDu más elevado que en las otras dos fases.

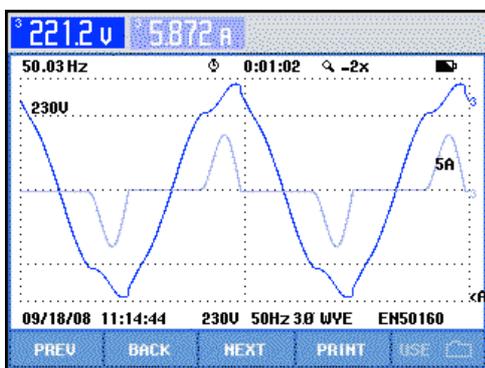


Figura N° 12: Forma de onda de corriente y tensión

Promedios

Corriente: 5,7 [A]
 THDI: 100 [%]
 THDU: 6,9 [%]
 fp: 0,38
 Cos φ: 0,56

En la figura 13 se observa como se deforma solamente una fase, conectando 20 LFCs en la fase 3 y resistencias en las fases 1 y 2, observando que se tenga una deformación no tan acusada como en el caso anterior, principalmente debido a la menor cantidad de lámparas.

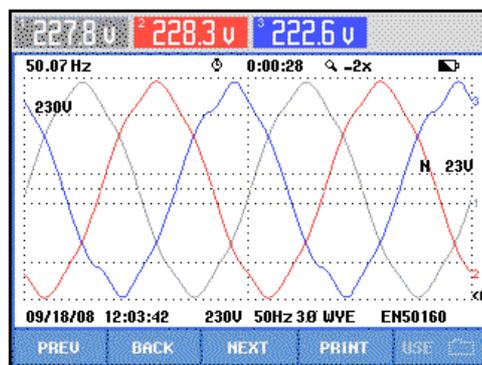


Figura N° 13: Forma de onda de tensión

Promedios

THDU-fase 1: 3,46 [%]
 THDU-fase 2: 3,46 [%]
 THDU-fase 3: 5,50 [%]

En el caso de que la carga se distribuya equilibradamente entre las fases y a la carga inicial de lámparas se le agregue un consumo resistivo puro, la onda de corriente muy deformada se monta sobre la onda senoidal, propia de la carga resistiva conectada. (Fig. 14).

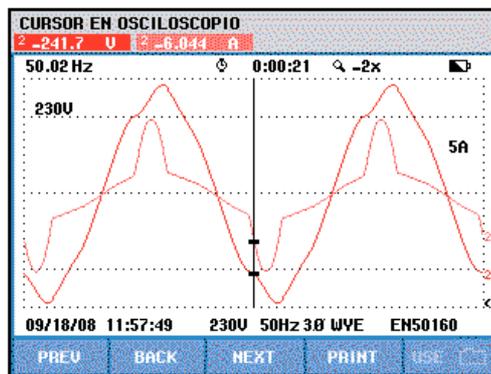


Figura N° 14: Forma de onda de corriente y tensión

Promedios

Corriente: 4,40 [A]
 THDI: 53,5 [%]
 THDU: 5,4 [%]
 FP: 0,99
 Cos φ: 0,99

Conclusiones

Conectando a un transformador lámparas fluorescentes compactas llegamos a tener una deformación considerable de la onda de tensión. En este mismo ensayo, se midió una corriente en el conductor neutro, principalmente proporcionada por los terceros armónicos.

Tener en cuenta que los transformadores de distribución no solamente tienen conectadas lámparas fluorescentes

compactas, sino que están expuestas a un consumo con mucho mas contenido de armónicos, ya que debemos sumar todas las fuentes conmutadas de los equipos electrónicos. Después de todos los ensayos realizados y relacionando con la actualidad energética de la Republica Argentina podemos concluir en que las lámparas fluorescentes compactas son una buena solución rápida y en carácter de urgencia para disminuir la demanda en energía eléctrica, salvando todos los inconvenientes que posee. Ya que poniendo en la balanza su bajo factor de potencia, su elevado THDi, etc. contra el ahorro de energía, este ultimo pesa con gran importancia sobre la situación actual de nuestro país. En un futuro cercano es primordial mejorar la utilización de este tipo de lámpara, por ejemplo implementando normas de calidad más exigentes para la comercialización de las mismas, implementando LFCs con filtros. Estas mejoras redundará en una disminución del THDi acompañadas de su mejor eficiencia energética.

IV. MODELADO DE UNA LFC

Se pretende estudiar el comportamiento de una red frente a la presencia de cargas alineales que inyectan corrientes distorsionadas. El estudio se esta realizando con la herramienta Simulink, de Matlab.

Una carga alineal conectada a la red generará una corriente distorsionada con un cierto contenido de armónicas. Si se conocen los valores de amplitud, fase y frecuencia de cada armónico presente en la corriente de la carga, podremos simular la corriente distorsionada e introducirla al modelo (fig. 15). Para conocer los parámetros mencionados de la carga alineal, basta medirlas adecuadamente con el uso de un equipo analizador de calidad de energía.

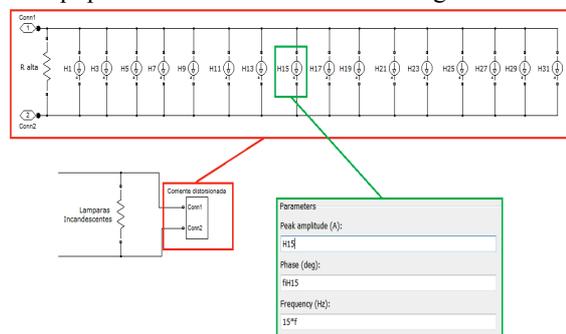


Figura N° 15: Modelado con fuentes de corriente de una LFC

En la figura 16 se muestra el resultado obtenido de la simulación realizada con Simulink, representando a cada armónica de una LFC con una fuente de corriente, en base a los datos obtenidos de las mediciones realizadas a las lámparas.

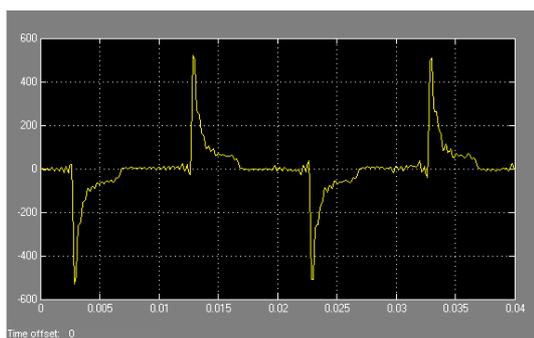


Figura N° 16: Forma de onda de corriente una LFC simulada con Simulink

Con un modelo de Simulink, realizado con una fuente ideal de tensión trifásica senoidal, una impedancia RL por fase, la impedancia de neutro, los bloques correspondientes a la corriente de las LFC y finalmente, los bloques usados para la medición de corrientes, tensiones, THD, RMS. En la figura 17 vemos la forma de onda de tensión distorsionada por la carga alineal de las LFCs.

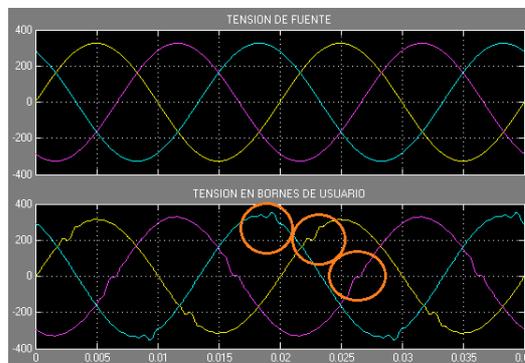


Figura N° 17: Forma de onda de tensión

El paso siguiente es incorporar el trafo de distribución y el resto de las cargas que se presentan en un barrio de viviendas de manera de concluir con el estudio. No obstante a continuación se detallan algunas conclusiones obtenidas de los estudios.

Conclusiones

-Para una impedancia de línea fija, la tensión en bornes del usuario se va distorsionando cada vez más a medida que se agregan LFC.

-La distorsión armónica de la tensión en bornes del usuario es proporcional a la impedancia de línea, por lo que uno de los métodos para mejorar la calidad de energía sería disminuir el valor de impedancia entre el usuario y la fuente de tensión. Por ejemplo, podrían colocarse conductores de mayor sección.

-En todos los casos, el usuario más perjudicado es el de cola de línea, puesto que es el que tiene mayor impedancia hasta la fuente. No solo percibirá las mayores caídas de tensión, sino que estará expuesto a los mayores niveles de distorsión armónica de tensión en bornes.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1]- Calidad de Potencia para usuarios y empresas eléctricas
Dr. Ing. Juan Carlos Gomez Tarragona
Primera edición. Buenos Aires. Editorial Editar. Año 2005

[2]- Parámetros que Afectan la Corriente de Neutro en Presencia de Armónicos
Juan A. Suárez, Guillermo F. di Mauro, Daniel O. Anaut y Carlos Agüero
Información Tecnológica Vol. 21(1), 77-89 (2010)
doi:10.1612/inf.tecnol.4144it.08

[3]- Armónicos-Dimensionado del neutro en las instalaciones ricas en armónicos.
Prof. Jan Desmet, Hogeschool West-Vlaanderen & Prof. Angelo Baggini, Università di Bergamo. Junio 2003.
Leonardo Power Quality Initiative.

[4]- Las peculiaridades del tercer armónico.
Jacques SCHONEK.
Cuaderno Técnico Schneider n° 202

[5]- Tanides, M. Brugnoli and G. Dutt, "Characterisation of residential electricity use in Argentina and implications for energy conservation

programmes”, Universities Power Engineering Conference 1996, Iraklio, Creta, Grecia, 18 al 20 de septiembre 1996.

VI. BIOGRAFÍAS



Jorge Andres Caminos, Ingeniero Electricista, egresado de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional Argentina, en 1983. Es Director del Grupo de Estudios Sobre Energía GESE y profesor Instrumentos y Mediciones Eléctricas. Su área de interés está dirigida a la investigación de la eficiencia energética y calidad de la energía eléctrica. Es autor y

co-autor de varias publicaciones científicas.



Carlos Gustavo Pacheco, Ingeniero Electricista, egresado de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional Argentina, en 1989. Es integrante del Grupo de Estudios Sobre Energía GESE y profesor Instalaciones Eléctricas y Luminotecnia. Su área de interés está dirigida a la investigación de la eficiencia energética y calidad de la energía eléctrica. Es autor y co-autor de varias

publicaciones científicas.



Adrian D'Andrea, Ingeniero Electricista, egresado de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional Argentina, en 2004. Es integrante del Grupo de Estudios Sobre Energía GESE y JTP de Integración Eléctrica II. Su área de interés está dirigida a la investigación de la eficiencia energética y calidad de la energía eléctrica. Es autor y co-autor de varias publicaciones científicas.

Julio Cesar Doyharzabal, Ingeniero Electricista, egresado de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional Argentina, en 1994. Es integrante del Grupo de Estudios Sobre Energía GESE y profesor Integración Eléctrica II. Su área de interés está dirigida a la investigación de la eficiencia energética y calidad de la energía eléctrica. Es autor y co-autor de varias publicaciones científicas.



DISMINUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

ISSN 1809-3957

A. BOUCÍGUEZ, *DOCENTE- INVESTIGADOR, UNSA*, M. MORALES, *BECARIO, UNSA*, M. VILTE, *DOCENTE- INVESTIGADOR, UNSA* Y R. LOZANO *DOCENTE- INVESTIGADOR, UNSA*

Resumen-- Se estudia el acondicionamiento térmico utilizando materiales de origen orgánico, con cambio de fase sólido - líquido, en el rango de temperaturas en que se desea acondicionar. Estos pueden usarse para diversos fines, desde habitacionales hasta agrícolas, siendo capaces de mantener una temperatura adecuada, durante más de un día, de acuerdo a las condiciones ambientales externas. Se presentan algunos ejemplos de su utilización, así como cálculos predictivos del comportamiento de la sustancia al ser sometida a distintas condiciones de operación. Se exhiben diferentes propuestas de acondicionamiento térmico con tales materiales, que permitirán lograr un buen nivel de confort, disminuyendo la utilización de combustibles tradicionales, lo que contribuye a reducir la contaminación ambiental generada por estos últimos.

Palabras claves-- Acondicionamiento térmico, ahorro energético, cambio de fase, frontera libre, problema de Stefan, sustancias orgánicas.

I NOMENCLATURE

ρ	densidad (kg/m ³)
c	capacidad calorífica (J/kg grado)
k	conductividad térmica (W/m grado)
$u(x,t)$	temperatura en coordenadas cartesianas (°C)
x	variable especial (m)
t	variable temporal (seg, hs)
q	flujo de calor (W/m ²)
$s(t)$	posición de la interfase (m)
L	calor latente de fusión (W/m ³)
r	coordenada radial (m)
z	coordenada longitudinal (m)
$u(r,z,t)$	temperatura en coordenadas cilíndricas (°C)

II INTRODUCTION

EL consumo energético para acondicionamiento térmico, requiere determinada cantidad de energía, de acuerdo a los niveles de confort requeridos, situación que está vinculada con los distintos usos a los que estén destinados los ambientes a acondicionar; los que pueden ser sumamente variados: viviendas, escuelas, centros sanitarios, parajes policiales, estaciones de control, etc.

Podrá existir también la necesidad de acondicionar recintos destinados al cultivo, acopio o transporte de sustancias alimenticias, tales como invernaderos, secaderos, galpones, camiones, etc. Para todos estos fines, es común la utilización de sistemas tradicionales de calefacción y/o refrigeración que importan un cierto gasto energético, el que proviene en general de una fuente de energía convencional; siendo las más utilizadas la red de distribución gas o de energía eléctrica.

Esto implica un fuerte gasto de combustibles tradicionales

que hoy es necesario moderar, no solo por su disponibilidad y precio, sino también por la contaminación que su uso produce.

La utilización de sustancias de cambio de fase, en transición sólido – líquido, ha sido propuesta y estudiada por varios autores, [1] para diversos usos, tanto con materiales inorgánicos como orgánicos, siendo estos últimos más recomendables en razón de sus propiedades térmicas y su estabilidad. [2], [3]

Ellos pueden utilizarse puros, combinados entre sí o con otros elementos constructivos; tales como yeso o cemento, con el propósito de acondicionar térmicamente un ambiente, el que puede estar destinado a los más variados usos: desde una vivienda al transporte de los más diversos productos. [7], [8]

Asimismo, puede ser necesario el acondicionamiento de recintos destinados a fines específicos, donde sea necesario mantener una temperatura dentro de un pequeño margen de variación, como es el caso de la producción de biogás a pequeña escala. [4], [9]

Es deseable que el punto de fusión del material de cambio de fase, se encuentre en el rango en que se desea mantener el recinto a acondicionar. Cabe señalar, que tales materiales pueden utilizarse en un vasto intervalo de temperaturas, dado que existen diversas sustancias que generalmente, presentan fusión en el margen empleado en el acondicionamiento térmico; por otra parte pueden combinarse entre si o agregarse excipientes que cambien su punto de fusión. [10], [12], [13]

La sustancia de cambio de fase, puede colocarse sólida o líquida, de acuerdo a las condiciones ambientales y a las temperaturas que se desee mantener el recinto a condicionar.

Sin pérdida de generalidad, se asumirá que se encuentra inicialmente sólida, alcanzando, por ingreso de calor, el estado líquido en el transcurso del tiempo. Asimismo, en tal estado, podrá estar a temperatura igual o menor a la de fusión. Por contacto con el ambiente externo, aumentará su temperatura tornándose paulatinamente líquida. A mediada que esto ocurre, la superficie de separación entre ambas fases: la líquida emergente y la sólida inicial, se desplazará hacia el extremo no expuesto al ambiente, de acuerdo a una ley que no se conoce a priori; por tanto, la posición de esta interfase, debe estimarse conjuntamente con la distribución de temperaturas en la sustancia. Tal problema se denomina de Stefan.

Cuando la temperatura inicial es menor a la fusión, por adición de calor, la sustancia aumenta su temperatura hasta

que aparecen las primeras gotas de líquido y comienza el proceso de fusión, lo que da lugar al desplazamiento del sólido originalmente presente y el aumento de la cantidad de líquido emergente, existiendo un gradiente de temperatura en ambas fases. En cambio, si la sustancia se encuentra inicialmente a la temperatura de cambio de fase, el sólido original se mantendrá a esta temperatura, mientras que el líquido emergente la aumentará, de modo que solo existe gradiente de temperatura en la fase líquida. En el primer caso, el problema se denomina a dos fases, en el segundo a una fase; siendo éste último la situación límite a estudiar. [14]

Se presenta a continuación la formulación del problema en coordenadas cartesianas, su resolución, el comportamiento experimental de la sustancia de cambio de fase y algunas aplicaciones llevadas a cabo.

III FORMULACION DEL PROBLEMA

El problema matemático a plantear es el de Stefan a una fase, el que presenta solución analítica cuando la temperatura en el borde fijo se mantiene constante (o su equivalente, cuando el flujo de calor es de la forma $1/t^{1/2}$) [5], por lo que generalmente debe recurrirse a métodos numéricos para su resolución. Se ha considerado que el problema es semi - infinito, pues las condiciones involucradas son válidas mientras que exista sustancia sólida en el interior del recinto que contiene la sustancia de cambio de fase. Un esquema de la sustancia de cambio de fase en el tiempo $t=0$ y en otro posterior t_1 , se muestra en la Fig. 1, donde también se señala la posición de la frontera $s(t)$ y el flujo de calor q que recibe a través de la superficie expuesta denotada con $x=0$.

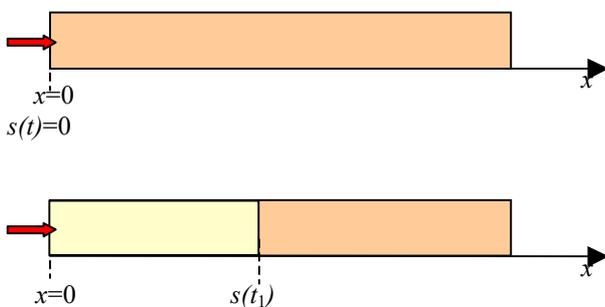


Fig. 1: Esquema del material de cambio de fase

Cabe señalar que la dirección de ingreso de calor puede ser por una pared lateral o una superficie horizontal.

A. Formulación Matemática

El problema a analizar es el de Stefan a una fase, el que resulta completamente descrito por la ecuación de difusión en la fase líquida y la condición de Stefan en la interfase, más las correspondientes condiciones iniciales y de contorno. El flujo de calor q que recibe la sustancia se considera constante.

Dicho problema resulta completamente descrito por las ecuaciones (1) a (5).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad 0 < x < s(t) \quad (1)$$

$$\rho L \frac{ds(t)}{dt} = -k \frac{\partial u(x = s(t)^-)}{\partial x} \quad \forall t > 0 \quad (2)$$

$$u(s(t), t) = 0 \quad \forall t > 0 \quad (3)$$

$$s(0) = 0 \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = q \quad \forall t > 0 \quad (5)$$

Donde $u(x, t)$ es la temperatura del material de cambio de fase, respecto a la de fusión, función de la posición x y del tiempo t , $s(t)$ es la posición de la interfase, k es la conductividad térmica del material, ρ su densidad, α su difusividad térmica y L su calor latente de fusión.

B. Resolución numérica

Dadas las condiciones planteadas, el problema solo puede resolverse numéricamente; para ello se ha realizado un programa en lenguaje *Mathematica*, el que haciendo uso de las subrutinas que tiene implementadas permite calcular simultáneamente la posición de la interfase y la distribución de temperaturas en la sustancia

El esquema de resolución numérica se ajusta al presentado por Nochetto [11], el mismo requiere cierta regularidad en la frontera $s(t)$, en particular que sea siempre creciente, situación que se cumple en la mayor parte de los problemas de frontera libre y en éste en particular.

C. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos, para la posición de la interfase y la distribución de temperaturas en el líquido emergente se presentan en las Figs. (2) a (4), para flujos de calor de 20 y 60W/m².

La Fig. (2) muestra la posición de la interfase sólido – líquido y la temperatura en el borde expuesto para ambos flujos, en función del tiempo. La posición se indica en mm, a fin de observar claramente la evolución temporal de la frontera libre y no complicar el gráfico con ceros adicionales, como sucedería al expresarlo en metros. En la leyenda de la figura se indica cual es el flujo respectivo, luego de la identificación de la frontera $s(t)$ o la temperatura $T(0, t)$.

En ella se observa que, al cabo de tres días la temperatura en el borde expuesto se ha incrementado 1°C respecto a la de fusión del material y la interfase se ha movido 4 cm desde el borde que recibe calor, para el flujo de 20W/m²; mientras que en el mismo tiempo, la temperatura en el borde que recibe calor se ha incrementado en 7°C y la posición de la frontera alcanza los 10 cm, para el flujo de 60W/m²

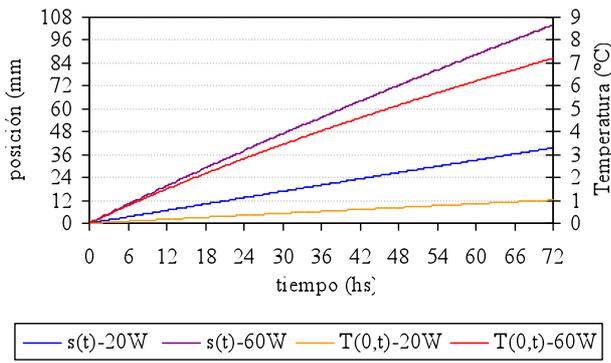


Fig. 2: Posición de la interfase y temperatura en el borde para ambos flujos.

Las Figs. (3) y (4) muestran la distribución de temperaturas en el interior de la sustancia en función de la posición, para distintos tiempos posteriores al inicio del proceso de adición de calor, cuando la sustancia se encuentra expuesta a un flujo de 20W/m^2 y 60W/m^2 , respectivamente.

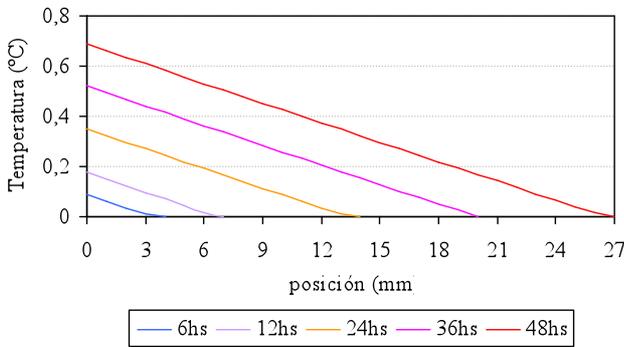


Fig. 3: Temperatura en el líquido para $q=20\text{W/m}^2$.

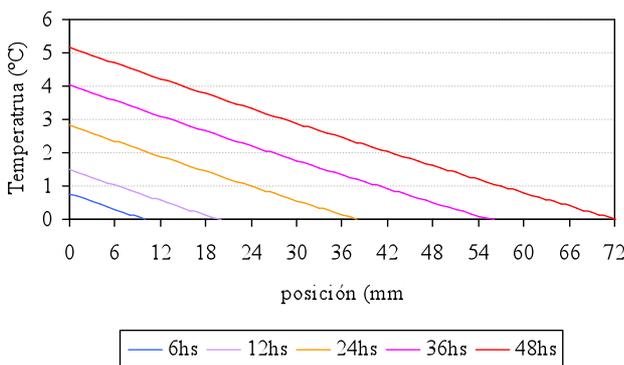


Fig. 4: Temperatura en el líquido para $q=60\text{ W/m}^2$.

En ellas se observa que, como es de esperar, la distribución de temperatura en el interior de la sustancia, depende fuertemente del flujo de calor al que se encuentra sometido; así cuando éste es de 20W/m^2 , al cabo de 36hs, la temperatura en el borde ha ascendido poco más de medio grado, mientras que la interfase se ha desplazado unos 20mm del borde expuesto; en el mismo tiempo, cuando el flujo es de 60W/m^2 , la temperatura en el borde ha ascendido 4°C por encima de la de fusión y la frontera se ha desplazado 54mm de su posición original.

El flujo de 20W/m^2 puede deberse a la emanación de

calor, proveniente de un producto agrícola, debido a su tasa de respiración, por lo que la sustancia de cambio de fase, atenuaría el incremento de temperatura, producido por esta tasa, en el recinto donde se encuentre el producto, lo que contribuye a retardar su maduración.

El flujo de 60W/m^2 puede ser el recibido por la sustancia de cambio de fase cuando se encuentra en el interior de un invernadero o un espacio sombreado en un habitáculo, la absorción de calor por la sustancia ayuda a moderar la temperatura del mismo, así como a almacenar calor para entregarlo en otro momento del día.

IV COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL

Las grasas orgánicas no presentan, en espesores pequeños, efectos convectivos apreciables [6].

Por otra parte, si se encuentran sólidas, al ser expuestas a flujos de calor, desde la superficie inferior, el líquido permanece por debajo del sólido; mientras que si se encuentran líquidas, al ser enfriadas desde la misma superficie, el sólido permanece por debajo del líquido, tal como se aprecia en la Fig. 5. Cabe destacar que tal comportamiento facilita notablemente los cálculos que permiten determinar la distribución de temperaturas y la posición de la interfase.

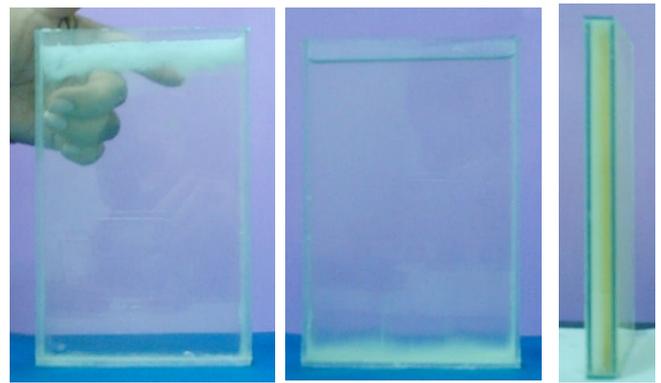


Fig. 5: Comportamiento de la sustancia de cambio de fase.

En la Fig. 5, la parte (a) muestra el resultado del ingreso de calor por la superficie inferior, donde el líquido se mantiene por debajo del sólido existente; la (b), presenta su comportamiento, cuando al encontrarse inicialmente líquida, es enfriada desde la base, el sólido queda por debajo del líquido existente; la (c), el resultado del avance del frente de fusión, cuando encontrándose inicialmente sólida, ingresa calor desde una de las paredes laterales, observándose que tal frente de fusión es prácticamente plano.

V ALGUNAS APLICACIONES PRACTICAS

La utilización de sustancias de cambio de fase en general y de las grasas orgánicas en particular, resulta interesante en el acondicionamiento pasivo de recintos destinados diversos usos. Se presenta como ejemplo, la posibilidad de acondicionar térmicamente un invernadero y un biodigestor a pequeña escala.

En el caso de un invernadero se ha evaluado la factibilidad de utilización de estos materiales, para el

mantenimiento de temperaturas en el interior del mismo. Ellas acumulan, durante el día el calor que recibe el recinto; para entregarlo en horas en que éste no se encuentra expuesto a la radiación solar. Para realizar dicha evaluación, se ha considerado una contenedor cilíndrico de 50 cm de longitud, radio interno $R_1=2\text{cm}$ y externo $R_2=15\text{cm}$, que contiene sustancia de cambio de fase. El mismo es sometido a las condiciones de temperatura reales, medidas en el interior de un invernadero en la ciudad de Salta, en un día soleado típico de invierno. En la Fig. 6 se muestra dicho registro y el ajuste realizado a los fines del cálculo. La temperatura de fusión de la sustancia es de 10°C

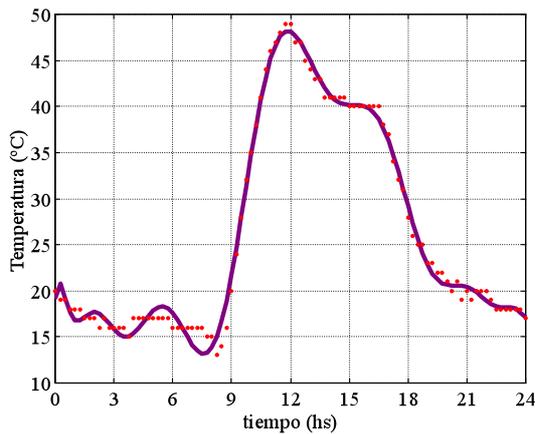


Fig.6: Temperatura en el interior del invernadero en invierno.

Se evaluó la distribución de temperaturas en el interior del recipiente que contiene la sustancias de cambio de fase en función del radio r , la longitud z y del tiempo t . En la Fig. 7 se muestran las isoterma en función de r y t , en la mitad de la altura del cilindro ($z=25\text{cm}$). En ella se observa que las máximas temperaturas se encuentran en un pequeño intervalo comprendido entre las 12 y 16 hs, intervalo en que el frente de fusión presenta un mayor avance tanto desde la superficie exterior como interior. Se observa una zona de sustancia en estado sólido, que permanece hasta el final del proceso. Desde el inicio hasta aproximadamente las 8hs no se aprecia un avance significativo de la frontera, esto con acuerdo con las condiciones aplicadas a la sustancia, dado que la temperatura se encuentra próxima a la de fusión; a partir de ese momento ésta se eleva rápidamente y en consecuencia la frontera avanza a mayor velocidad.

En la Fig. 8 se presenta la distribución de temperaturas en función del radio y para la mitad de la altura del contenedor. Se advierte como cambia la dependencia de la temperatura con el radio, desde la superficie interna y externa, dando lugar a un avance desigual de los frentes de fusión desde ambas superficies. También queda claro como avanza la frontera desde las superficies interna y externa, ya que éste se encuentra situado en el lugar en que la temperatura es de 10°C . Es de notar que, a pesar de que la temperatura externa, está próxima a la de fusión, la interfase líquido – sólido sigue avanzando hacia el centro de la cavidad; esto es así porque la sustancia, aunque en menor medida, sigue recibiendo energía; por ello la frontera sigue avanzando aunque más lentamente que en horas en que la temperatura externa es mayor.

Volume 7 – n. 75 – Marzo/2012

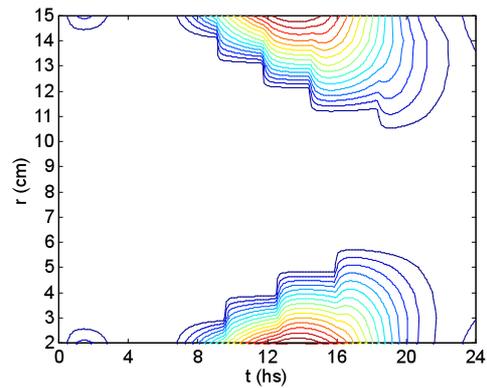


Fig. 7: Isoterma en función de r y t para $z=25\text{ cm}$

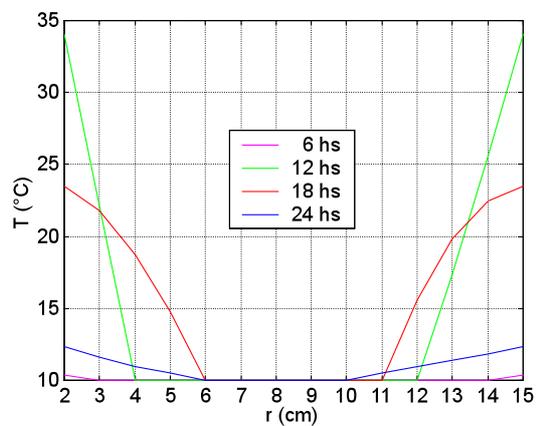


Fig. 8: Temperaturas a 12, 16 y 24hs en función de r para $z=25\text{ cm}$

En la Fig. 9 se presentan las isoterma en función de r y z , para $t=12$ y 24hs , donde se observa como se reduce la zona de sustancia sólida al transcurrir el tiempo. Al cabo de 24 hs todavía permanece sólido el interior del cilindro, lo que indica que es posible disminuir el volumen de la cavidad cilíndrica, sin reducir la acumulación de energía en la sustancia.

Las máximas temperaturas se presentan a las 12 hs, bajo estas condiciones los frentes de fusión provenientes de todas las superficies avanzan con mayor velocidad. En todo momento se observa sustancia en estado sólido del centro de la cavidad, aunque la distribución no es simétrica; en concordancia con lo observado en la Fig. 8.

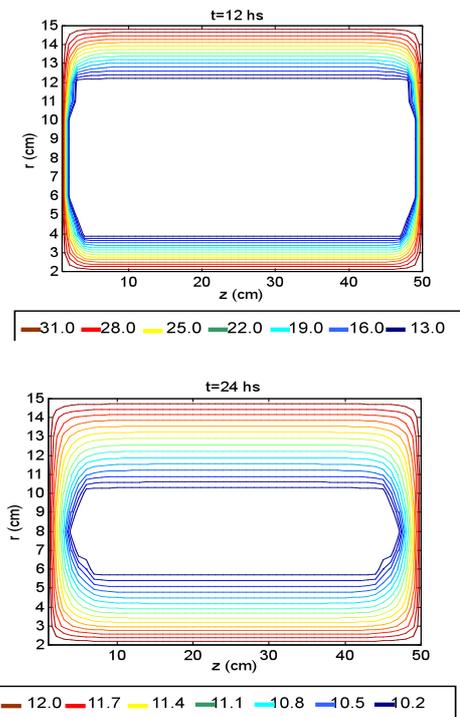


Fig. 9: Isotermas en función de r y z, a las 12 y 24 horas

En el caso de biogestión anaeróbica, las sustancias de cambio de fase, se utilizan para contribuir a mantener las temperaturas adecuadas en el sustrato, a fin de asegurar la continuidad del proceso.

Las bacterias productoras de biogás, son sumamente sensibles a los cambios de temperatura, por lo que mantener las condiciones térmicas dentro de un biodigestor resulta crucial para la obtención de biogás. Aunque las condiciones térmicas en las que operan los reactores permiten un amplio rango de temperaturas, una vez iniciado el proceso de biogestión, ésta debe mantenerse tan constante como sea posible para su correcta operación.

A los fines de analizar tal proceso, se montó una experiencia en la terraza del edificio de Física, de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta, donde se cuenta con la infraestructura necesaria para la instalación de equipos de toma y adquisición de datos, así como para la realización de experiencias. El dispositivo consta de un invernadero pequeño de forma cilíndrica de 60 cm de radio y 80 cm de altura, con cubierta de plástico de polietileno LDT de 150 micrones; un recipiente de vidrio que actúa como digestor con una capacidad de 20.4 litros, rodeado de la sustancia de cambio de fase de 2.7 cm espesor. En la Fig. 10 se muestra el recipiente con el sustrato para la biogestión y el material de cambio de fase rodeándolo, listo para ser introducido en el pequeño invernadero construido a estos fines.



Fig. 10: Sustrato para biogestión y material de cambio de fase

En la Fig. 11 se presenta el registro correspondiente a dos días seguidos en los que las temperaturas máximas y mínimas fueron de 25°C y 5°C y de 22°C y 5.5°C para el primer y segundo día, respectivamente. La temperatura ambiente exterior es “Text”, graficada en color marrón; en el interior del invernadero “Tinv”, en color azul; en la superficie externa con el sensor en contacto con la sustancia de cambio de fase “Tse”, en color verde; en la superficie interna de la misma sustancia, la que se encuentra en contacto directo con recipiente que contiene el sustrato (“Tsi”, en color negro) y en el centro del dicho recipiente “Tint”, en color rojo. En ella se observa que la temperatura del sustrato es moderada por el material de cambio de fase, encontrándose alrededor de los 22°C

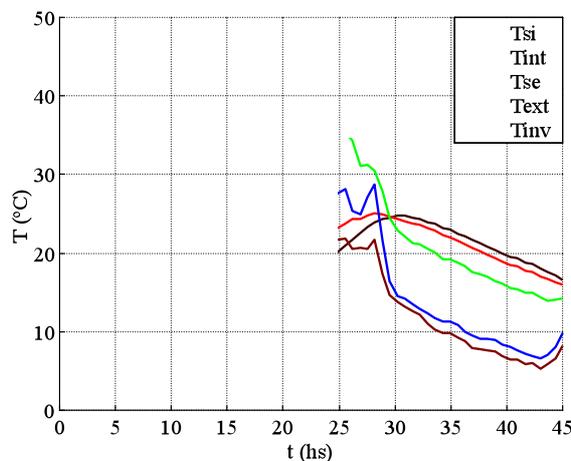


Fig. 11: Temperaturas en un biodigestor con material de cambio de fase dentro de un pequeño invernadero.

VI CONCLUSIONES

La utilización de grasas orgánicas resulta particularmente interesante en el acondicionamiento pasivo o semi – pasivo de recintos destinados a diversos usos, donde normalmente se utiliza algún tipo de energía convencional, generalmente eléctrica, colaborando a su sustitución.

Se ha evaluado el comportamiento de la sustancia de cambio de fase al ser sometida a dos flujos de calor constante, observando que ella es capaz de absorber este calor, lo que contribuye a la regulación de las temperaturas en el ambiente donde tales sustancias están colocadas.

En particular, se han presentado dos ejemplos de uso, aunque cabe destacar que los materiales de cambio de fase

pueden emplearse en otras situaciones, lo que constituye una alternativa que permite ahorrar energía convencional, que podría utilizarse para otros fines. Esto constituye también un ahorro en los costos de electricidad o gas utilizados para mantener las temperaturas requeridas con el propósito de lograr el acondicionamiento adecuado dentro de los niveles de confort requeridos.

VII AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se desarrolla en el marco del Proyecto de Investigación N° 1886 y del Trabajo de Investigación N° 1941; del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, a quien se agradece su financiamiento.

VIII REFERENCIAS

Artículos:

- [1] M. Farid, A. Khudhair, S. Razack y S. Al-Hallaj, "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications." *Energy Conversion and Management* 45, pp. 1597 – 161, 2004.
- [2] D. Feldman, D. Banu y D Hawes, "Low Chain Esters of Stearic Acid as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage in Building". *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 36 pp. 311 – 322, 1995.
- [3] A. Hasan y A. Sayigh, "Some Fatty Acids as Phase Change Thermal Energy Storage Materials". *Renewable Energy*, Vol. 4, N° 1, pp. 69 – 76, 1994.
- [4] J. Pfeffer, "Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse". *Biotechnology and Bioengineering*. N° 16, 771-787, 1974.
- [5] A. Boucíguez, R. Lozano y M. Lara, "Some Considerations Regarding The Exact Solution in The One Phase Stefan Problem" *Revista Engenharia Térmica. (RETERM) ABCM*. Vol. 5 N° 01, pág.35 – 39, 2006.
- [6] M. Vilte y A. Boucíguez, "Estudio Experimental del Efecto de Convección en un Recinto con Material de Cambio de Fase" *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 14, pág. 03.199 - 03.206, 2010.

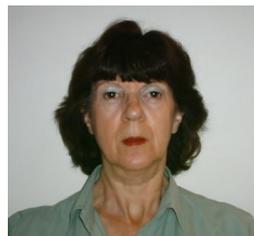
Proceedings:

- [7] G. Plaza, A. Boucíguez y L. Saravia, "Modelo Térmico Experimental de una Mezcla de Yeso con Estearato de Butilo como Material de Cambio de Fase". *Actas de la XII Reunión de Asociación Argentina de Energía Solar*. Tomo II, pág. 341 – 348, 1987.
- [8] A. Boucíguez y L. Saravia, "Muro Colector Acumulador Usando Estearato de Metilo" *Actas de la XIV Reunión de Asociación Argentina de Energía Solar*. pág. 309 – 314, 1990.
- [9] M. Morales, A. Boucíguez y G. Plaza, "Estudio de Factibilidad de Acondicionamiento Térmico de un Biodigestor con Sustancias de Cambio de Fase". *ENIEF 2009, Mecánica Computacional. Asociación Argentina de Mecánica Computacional*. Vol. XXVIII, pág. 3093– 3101, 2009
- [10] M. Domínguez, J. Culubret, R. Mascheroni, P. López, J. Pinillos y C. García, "La acumulación de energía con cambio de fase a temperaturas positivas en instalaciones de climatización" *VI Congreso Iberoamericano de Aire Acondicionado y Refrigeración*, N°45, pp. 649-657, 2001.
- [11] R. Nochetto, "Una Introducción General a la Resolución Numérica del Problema de Stefan Unidimensional" *Cuadernos del Instituto de Matemática "Beppo Levi"*. Universidad Nacional de Rosario, pág.143 -166, 1984.

Libros:

- [12] D. Swern, "Physical Properties of Fats and Fatty Acids" Cap. 3 *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 1964.
- [13] R. Lenga, "Catalog Handbook of Fine Chemicals." Aldrich Chemical Company, Inc. United States, 1990.
- [14] V. Alexiades y A. Solomon, "Mathematical Modeling of Melting or Freezing Processes." *Hemisphere Publishing Corporation, A Member of the Taylor & Francis Group*, 1993.

IX BIOGRAFIAS



Angélica Boucíguez: Profesor Adjunto de Termodinámica en la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta, (UNSa) Argentina. Doctora en Ciencias, Area Energías Renovables. Dirige Proyectos de Investigación en Energías Renovables y Problemas de Frontera Libre, en especial orientada al acondicionamiento térmico con sustancias



Martín Morales: Jefe de Trabajos Prácticos en la Sede Sur, Dep. Metan, de la UNSa. Licenciado en Física. Becario de Investigación CONICET –. UNSa, cursando sus estudios de doctorado en la UNLP. Trabaja en problemas de difusión y en biodigestión anaeróbica.



María del Socorro Vilte: Jefe de Trabajos Prácticos en la Facultad de Ciencias Exactas de la UNSa. Licenciada en Física y se encuentra realizando la Maestría en Energías Renovables. Dirige Trabajos de Investigación sobre Energías Renovables y Problemas de Frontera Libre, en especial al estudio experimental de sustancias de cambio de fase.



Ricardo Lozano: Se desempeña como Jefe de Trabajos Prácticos en la Facultad de Ciencias Exactas de la UNSa. Es Profesor en Matemática y Física y se encuentra finalizando la Licenciatura en Física. Participa en proyectos de Investigación sobre Problemas de Frontera Libre y sus aplicaciones, en especial en modelos numéricos.