NÚMERO ESPECIAL | 2020

ISSN 2183-0940

REVISTA TMQ

TECHNIQUES, METHODOLOGIES AND QUALITY

NÚMERO ESPECIAL

Sustentabilidade e Energias Renováveis

EDITORES CONVIDADOS:

HELENA NAVAS
Universidade Nova de Lisboa

DANIEL VAZ
Universidade Nova de Lisboa

EDITORES:

ANTÓNIO RAMOS PIRES
Instituto Politécnico de Setúbal

MARGARIDA SARAIVA
Universidade de Évora

ÁLVARO ROSA
ISCTE-IUL

REDE DE INVESTIGADORES DA QUALIDADE

A **REVISTA TMQ - TECHNIQUES METHODOLOGIES AND QUALITY** é uma marca registada no INPI com o Nº 614089 e sujeita os artigos publicados a dupla revisão por pares, estando disponível online em: https://publicacoes.riqual.org

A TMQ está indexada à Latindex - Sistema regional de informações on-line para revistas de investigação científica nos países da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal.

Responsabilidade: A RIQUAL ou seus representantes e os Editores não são responsáveis por qualquer erro(s), validade de dados / conclusões ou violação de direitos autorais em qualquer artigo publicado nesta revista. Os Autores são os únicos responsáveis por todo o conteúdo dos artigos publicados na revista.

The **JOURNAL TMQ - TECHNIQUES METHODOLOGIES AND QUALITY** is a registered trademark with INPI under Nº 614089 and is a peer-reviewed and publicly available journal, being available online at: https://publicacoes.riqual.org

TMQ is indexed at Latindex - Regional system of online information for scientific research journals in the countries of Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal.

Disclaimer: RIQUAL or its representatives and the Editors are not responsible for any error(s), validity of data/conclusions or copyright infringements in any article published in this journal. Authors are solely responsible for the entire contents of the paper published in the journal.

FICHA TÉCNICA:

Título: TMQ - TECHNIQUES METHODOLOGIES AND QUALITY, Número Especial – Sustentabilidade e Energias Renováveis | 2020
ISSN: 2183-0940
Editora: RIQUAL - Rede de Investigadores da Qualidade
Paginação e produção gráfica: RIQUAL
e-mail: info@riqual.org

TECHNICAL DATA SHEET:

Title: TMQ - TECHNIQUES METHODOLOGIES AND QUALITY, Special Issue – Sustainability and Renewable Energy | 2020
ISSN: 2183-0940
Publisher: RIQUAL - Network of Quality Researchers
Pagination and graphic production: RIQUAL
e-mail: info@riqual.org

MANAGING EDITORS:

António Ramos Pires, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal

Margarida Saraiva, Universidade de Évora, Portugal

Álvaro Rosa, ISCTE-IUL, Portugal

Helena Navas, Universidade Nova de Lisboa (Ed. Convidado)

Daniel Vaz, Universidade Nova de Lisboa (Ed. Convidado)

REVIEWERS:

Álvaro Rosa, ISCTE-IUL, Portugal

António Ramos Pires, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal

Margarida Saraiva, Universidade de Évora, Portugal

Luís Lourenço, Universidade da Beira Interior

Patrícia Moura e Sá, Universidade de Coimbra

Helena Navas, Universidade Nova de Lisboa

Daniel Vaz, Universidade Nova de Lisboa

EDITORIAL BOARD:

Albano Ferreira, Universidade Katyavala Bwila, Angola

Álvaro Rosa, ISCTE-IUL, Portugal

António Andrade, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

António Ramos Pires, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal

Artur Santana, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Dênis Cunha, Universidade Federal de Viçosa, Brasil

Elsa Simões, Universidade de Cabo Verde, Cabo Verde

Gerson Tontini, Universidade do Oeste de Santa Catarina, Brasil

José Álvarez-Garcia, Universidad da Extremadura, Espanha

José Sarsfield Cabral, Universidade do Porto, Portugal

Julio Macedo, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

Keylor Villalobos, Universidad Nacional de Costa Rica, Costa Rica

Luís Lourenço, Universidade da Beira Interior, Portugal

Manuel Suarez-Barraza, Instituto Tecnológico e de Estudos Superiores de Monterrey, México

Margarida Saraiva, Universidade de Évora, Portugal

Maria da Conceição Barbosa Mendes, Universidade Katyavala Bwila, Angola

Maria de la Cruz del Rio-Rama, Universidad de Vigo, Espanha

Martí Casadesús, Universitat de Girona, Espanha

Nelson António, ISCTE-IUL, Portugal

Patrícia Moura e Sá, Universidade de Coimbra, Portugal

Pedro Saraiva, NOVA IMS, Universidade Nova de Lisboa, Portugal

Virgílio Cruz Machado, Universidade Nova de Lisboa, Portugal

AUTHORS:

***SUSTENTABILIDADE*:**

Bruna Bessa Rocha - Universidade Estadual Paulista (Brasil)

João Flores - Universidade Nova de Lisboa (Portugal)

Júlia Seixas - Universidade Nova de Lisboa (Portugal)

Larissa Queiroz Minillo - Universidade Estadual Paulista (Brasil)

Martín Hidalgo Reyes - Universidad Autónoma Chapingo (México)

Miguel Cavique - Escola Naval (Portugal)

Ricardo Carrasco Carpio - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (Brasil)

Ricardo de Lima Silva - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (Brasil)

Sergio Augusto Mello da Silva - Universidade Estadual Paulista (Brasil)

Vladimir Berenguer Pina - Universidad Autónoma Chapingo (México)

GERAL RENOVÁVEIS:

Angie J. Valencia C. - Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)

Carlos Salgado - Laboratorio de Ensayo Cerylab Ltda., San Pedro de la Paz (Chile)

Edgar A. Portilla F. - CIDETEC, IPN (México)

Jorge Jiménez - Universidad de Concepción (Chile)

Mauricio F. Mauledoux M. - Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)

Miguel Hadzich Marín - Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú)

Oscar Farías - Universidad de Concepción (Chile)

Oswaldo Rivera R. - Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)

Sandra Vergara - Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú)

SOLAR:

André Guimarães Ferreira - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Brasil)

Bonifacio Gaona Ponce - Universidad Autónoma Chapingo (México)

Cristiana Brasil Maia - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (Brasil)

Gilberto de Jesús López Canteñs - Universidad Autónoma Chapingo (México)

Gisele Mol da Silva - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Brasil)

Ícaro Kleisson Araújo Lucena - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Brasil)

Jacqueline Biancon Copetti - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Brasil)

José Ubiragi de Lima Mendes - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Brasil)

José Weverton Oliveira Silva - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Brasil)

José Wilson Oliveira Silva - Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Rio Grande do Norte (Brasil)

Juan Carlos Olguín Rojas - Universidad Autónoma Chapingo (México)

Mario Henrique Macagnan - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Brasil)

Patrícia Scalco - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Brasil)

Synara Lucien de Lima Cavalcanti - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Brasil)

SOLAR FOTOVOLTAICO:

A. J. Marques Cardoso - Universidade da Beira Interior (Portugal)

Adérito N. Alcaso - Instituto Politécnico da Guarda (Portugal)

Alex Álisson Bandeira Santos - Centro Universitário SENAI CIMATEC (Brasil)

Alex Álisson Bandeira Santos - Centro Universitário SENAI CIMATEC (Brasil)

Bonifacio Gaona Ponce - Universidad Autónoma Chapingo (México)

C. A. Figueiredo Ramos - Instituto Politécnico da Guarda (Portugal)

Fernando Neto da Silva - Universidade de Aveiro (Portugal)

Francisco Muñoz Gómez - Universidad Autónoma Chapingo (México)

Gilberto de Jesús López Canteñs - Universidad Autónoma Chapingo (México)

João Pedro Brito de Andrade - Centro Universitário SENAI CIMATEC (Brasil)

José Paulo Oliveira Santos - Universidade de Aveiro (Portugal)

Juan Carlos Olguín Rojas - Universidad Autónoma Chapingo (México)

Leandro Henrique Pinto Dantas - Universidade de Aveiro (Portugal)

Noel Chávez Aguilera - Universidad Autónoma Chapingo (México)

Thiago da Paz Caldas - Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Brasil)

Thiago Lustosa Lima Dórea - Centro Universitário SENAI CIMATEC (Brasil)

Turan Dias Oliveira - Centro Universitário SENAI CIMATEC (Brasil)

ÍNDICE

EDITORIAL 9

La ingeniería mecánica agrícola en la calidad de los productos agropecuarios. Manejo, ecología y sustentabilidad 13
Vladimir Berenguer Pina || Martín Hidalgo Reyes

Technical and economic feasibility of co processing of meat and bone meal in a cement factory in Brazil 29
Ricardo de Lima Silva || Ricardo Carrasco Carpio

Avaliação de painéis de média densidade produzidos a partir de resíduos das indústrias de papel e celulose e sucroalcoleira para aplicação estrutural utilizando resina poliuretana 39
Larissa Queiroz Minillo || Bruna Bessa Rocha || Sergio Augusto Mello da Silva

Indústria da construção e mercado imobiliário: Uma oportunidade de financiamento dos objetivos de descarbonização para 2050 49
João Flores || Júlia Seixas || Miguel Cavique

Casa Ecológica PUCP: 25 años como Parque de Innovación en Energías Renovables en el Perú 65
Miguel Hadzich Marín || Sandra Vergara

Embedded generalize predictive controller for a micro-grid DC system 81
Angie J. Valencia C. || Mauricio F. Mauledoux M. || Oswaldo Rivera R. || Edgar A. Portilla F.

Impacto de la normativa ambiental chilena sobre el desarrollo tecnólogico de calefactores a biomasa 97
Oscar Farías || Jorge Jiménez || Carlos Salgado

Secador solar de milho: Uma alternativa sustentável e segura 115
Gisele Mol da Silva || André Guimarães Ferreira || Cristiana Brasil Maia

Medición y análisis térmico de un calentador solar de agua 137
Bonifacio Gaona Ponce || Gilberto de Jesús López Canteñs || Juan Carlos Olguín Rojas

Difração da luz solar aplicada na iluminação de ambientes 147
José Weverton Oliveira Silva || Ícaro Kleisson Araújo Lucena || José Wilson Oliveira Silva || Synara Lucien de Lima Cavalcanti || José Ubiragi de Lima Mendes

Análise térmica do receptor de um refletor Fresnel linear 165
Patrícia Scalco || Jacqueline Biancon Copetti || Mario Henrique Macagnan

Análise por termografia de módulos termofotovoltaicos 177
C. A. Figueiredo Ramos || Adérito N. Alcaso || A. J. Marques Cardoso

Estudo da influência de carenagens na eficiência de painéis fotovoltaicos: Uma abordagem energética e fluidodinâmica 193
Thiago Lustosa Lima Dórea || Alex Álisson Bandeira Santos || Turan Dias Oliveira || João Pedro Brito de Andrade

Modelo de simulação e análise de implantação de um sistema fotovoltaico: Estudo de caso em um centro de pesquisa 209
Thiago da Paz Caldas || Alex Álisson Bandeira Santos

Evaluación energética de un edificio para el cálculo de un sistema fotovoltaico 231
Gilberto de Jesús López Canteñs || Bonifacio Gaona Ponce || Francisco Muñoz Gómez || Noel Chávez Aguilera || Juan Carlos Olguín Rojas

Utilização de energia solar fotovoltaica para carregamento de veículos elétricos 241
Leandro Henrique Pinto Dantas || Fernando Neto da Silva || José Paulo Oliveira Santos

EDITORIAL

No presente número especial da Revista TMQ reunimos 16 artigos que nos falam de sustentabilidade de um modo geral, ou já particularizada na sua vertente energética, nomeadamente recursos renováveis. Mais de metade dos artigos referem-se, ainda mais em particular, a um destes recursos renováveis, a energia solar, seja no aproveitamento térmico ou no fotovoltaico.

Cerca de 40% das contribuições deste número provêm do Brasil, 20% de Portugal, e as restantes contribuições são de países americanos de língua castelhana, repartidas em partes iguais entre o México e o grupo formado pelo Chile, Colômbia e Perú.

No contexto da sustentabilidade surgem o conceito de economia circular e as estratégias visando a descarbonização das fontes energéticas. O primeiro artigo deste volume proporciona-nos, na sua introdução, uma súmula da problemática das alterações climáticas, abordando seguidamente a oportunidade da utilização de resíduos agrícolas na produção de embalagens para produtos agropecuários. Na mesma linha, outro artigo apresenta-nos a possibilidade de produzir painéis para aplicação estrutural a partir de resíduos vegetais de três indústrias transformadoras. Outro artigo, também de autores brasileiros, relata-nos o caso de matérias de origem animal que não têm sido devidamente eliminadas no Brasil, por falta de regulamentação adequada, e como o seu aproveitamento energético num forno de cimento se traduz em vantagens ambientais, sociais e económicas.

Um interessante ponto de vista sobre como as metas de eficiência energética não podem ser indiferentes a aspetos económicos é apresentado no quarto artigo deste número. Nele, os autores apresentam uma avaliação do comportamento do mercado imobiliário português a fim de explorar a possibilidade de utilizar valores induzidos pela especulação imobiliária para atingir metas mais ambiciosas de poupança de energia nos edifícios e lograr atingir as metas europeias para 2050.

O quinto artigo vem do Perú e narra a experiência de 25 anos na investigação, desenvolvimento e validação em meio rural de tecnologias de energias renováveis e a sua integração em casas ecológicas adaptadas a cada região climática do país (costa, serra e selva). Um desafio à produção distribuída de eletricidade renovável é a intermitência dos recursos naturais que mais comummente são considerados para tal: os recursos solar e eólico. Para tirar partido da complementaridade entre estes dois recursos, é necessário ter um bom controlador da micro-rede a que se encontrem ligados os equipamentos de conversão, e que não pode

dispensar capacidade de armazenamento. É este o tema do artigo que nos chega de uma colaboração entre autores da Colômbia e do México.

Para além da geração de energia elétrica podemos ainda recorrer às energias renováveis para obter calor para aquecimento de espaços. Contudo, ao recorrer à queima de lenhas para esse fim, há que atender a questões como a emissão de partículas, eficiência energética e segurança. Três autores chilenos esclarecem-nos como a introdução, em 2014, de uma norma de emissão para aquecedores a biomassa, populares em alguns centros urbanos do Chile, tem permitido melhorias naquelas três vertentes.

Arrumámos numa segunda parte desta coleção nove artigos sobre a energia solar. O Brasil, para além de ser um país com boa disponibilidade do recurso solar, é o terceiro maior produtor a nível mundial de milho. Assim, não nos deve surpreender que nos chegue um trabalho justamente sobre o aproveitamento da energia solar para o imperativo processo da secagem dos grãos, trabalho esse que tem por objetivo elucidar-nos sobre as vantagens ambientais, económicas e de segurança, desta alternativa. Os três artigos seguintes são mais técnicos, e relatam ensaios em ambiente controlado de: um painel solar plano para aquecimento de água, difração da luz solar através de garrafas PET cheias de soluções aquosas diversas para iluminação natural de espaços interiores e, por fim, o recetor de um refletor Fresnel linear.

Ainda em linha com uma abordagem mais técnica, seguem-se dois artigos sobre o melhor desempenho dos painéis fotovoltaicos quando arrefecidos: um em que dez painéis termo-fotovoltaicos foram avaliados experimentalmente por termografia, e outro, baseado em simulações de dinâmica de fluidos computacional e em análise termodinâmica, em que se estuda a influência de carenagens de característica difusora no escoamento de ar sobre os painéis e, consequentemente, no rendimento destes.

Os três últimos artigos consideram o processo de implantação, ou aplicação, de sistemas fotovoltaicos. No primeiro apresenta-se um estudo económico, sem esquecer a regulamentação aplicável, de implantação na cidade de Salvador, Brasil, a 13° latitude e com uma irradiação diária média anual de 5,3 kWh/m²/dia (que representa um valor médio no Brasil, embora seja superior ao que se verifica em qualquer ponto da Europa). No segundo, discute-se o dimensionamento de um sistema fotovoltaico misto (ligado à rede e incluindo baterias para autonomia de 5 horas) para um edifício universitário em Chapingo, México (19° latitude), com uma necessidade de potência de aproximadamente 60 kW/dia. Por fim, temos um artigo com a avaliação técnico-económica do fornecimento de energia elétrica por painéis fotovoltaicos na cobertura das instalações de uma empresa de serviços, para satisfazer tanto as necessidades do edifício como as da frota de veículos elétricos da empresa.

Terminamos desejando boa leitura e agradecendo o convite que nos foi formulado para sermos editores convidados deste número temático, convite esse que muito nos honrou.

Os Editores.

António Ramos Pires (Coordenador)

Margarida Saraiva

Álvaro Rosa

Os Editores Convidados,

Daniel Cardoso Vaz

Helena Victorovna Guitiss Navas

La ingeniería mecánica agrícola en la calidad de los productos agropecuarios. Manejo, ecología y sustentabilidad

Vladimir Berenguer Pina
vladimir@correo.chapingo.mx
Universidad Autónoma Chapingo, México

Martín Hidalgo Reyes
hogladi@hotmail.com
Universidad Autónoma Chapingo, México

Resumen:
El trabajo pretende mostrar los fundamentos iniciales de un proyecto integrador, encaminado esencialmente hacia el manejo de productos primarios y la mitigación del cambio climático. El Tiempo, que está presente en cada etapa de la producción primaria, y que, por su influjo, incide en la calidad de los productos agropecuarios. En cada etapa de la producción primaria están presente operaciones agrícolas, industriales y comerciales, y para ello, el manejo de los productos agropecuarios, la conservación de su calidad y presentación, son necesarios numerosos tipos de empaques, los que se diferencian entre sí por su diseño, materiales de fabricación, destino y funciones.
Es propósito de este proyecto utilizar materiales a partir se subproductos agrícolas. Para ello se pretende mostrar la Metodología General de Estudio, en la que se hace énfasis en el papel desempeñado por la influencia del tiempo en cada etapa de trabajo, este que, además, es el recurso que hoy se nos agota debido al dinamismo socioeconómico y tecnológico actual.
En este están consideradas pruebas y ensayos de: Comportamiento Mecánico de los Materiales, su Estructura, su Composición, Forma y Tamaño de las Partículas, Ensayos Químicos, y Microbiológicos para comprobar los efectos de la Biodegradación, así como pruebas Hidráulicas de Hermeticidad, Retención y Conducción de líquidos.

Palabras clave: biodegradable empaque subproducto manejo

Abstract:
The work aims to show the initial foundations of an integrative project, essentially aimed at primary product management and climate change mitigation. EL Time, which is present at every stage of primary production, and which, by its influx, affects in the quality of agricultural products.
In Every stage of the primary production is present agricultural, industrial and commercial operations, and for this, the management of the agricultural products, the conservation of their quality and presentation, are necessary many types of

packages, which are They differentiate with each other by their design, materials of manufacture, destiny and functions.
It is the purpose of this project to use materials from agricultural by-products. This is intended to show the General methodology of study, which emphasizes the role played by the influence of time in each stage of work, which is also the resource that today we are exhausted due to the socio-economic and technological dynamism Current.
In this are considered tests and trials of: Mechanical behavior of the materials, their structure, their composition, shape and size of the particles, chemical and microbiological tests to check the effects of the biodegradation, as well as hydraulic tests of hermeticity, retention and conduction of liquids.

Keywords: biodegradable packaging by product handling

---

1 Introducción

El crecimiento poblacional o crecimiento demográfico es el cambio cuantitativo de la población en un cierto período de tiempo, y puede ser cuantificado como el cambio en el número de individuos en una población durante un período de tiempo. Actualmente, la población del planeta aumentará de manera espectacular en las regiones más pobres del mundo, advierte la ONU. Conferencias de la ONU sobre el medio ambiente. (s.d.). Naciones Unidas - Centro de Información. México, Cuba y República Dominicana. Recuperado agosto 19, 2010. <https://www.ecured.cu/Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro> [Consulta: junio de 2017].

Hoy transcurre el tiempo más peligroso para la existencia de la humanidad, y esto debido a la explotación desmedida de las riquezas naturales, las consecuencias de este aberrante comportamiento fue abordado, por primera ocasión en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo celebrada en Río de Janeiro del 3 al 14 de junio de 1992, cuyo objetivo fundamental fue el de establecer una alianza mundial nueva y equitativa mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados, los sectores claves de las sociedades y las personas, procurando alcanzar acuerdos internacionales en los que se respeten los intereses de todos y se proteja la integridad del sistema ambiental y de desarrollo mundial. Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. 1992. De la Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro, a La Haya. Alicia Rivera. El País. Madrid. 13 de noviembre de 2000.

En la actualidad constituye un reto para la humanidad salvarse de ella misma, son muchos los propósitos, deseos, y esfuerzos que realizan los gobiernos, organizaciones no

gubernamentales, y la sociedad en general para contrarrestar y/o detener los cambios climáticos que se manifiestan diariamente, y que ponen en peligro la existencia y/o supervivencia de las especies vegetales y animales en el planeta incluido el hombre.

Acciones encaminadas para mitigar este fenómeno potencialmente devastador deben ser priorizadas en cada región del planeta, según las declaraciones de las Reuniones y Conferencias realizadas acerca de este tema. Cumbre de la Tierra. Rio de Janeiro. 1992. <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm> [Consulta: junio de 2017].

En la primera de ellas, se declara como primer principio, el de que: Los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible. Tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza. (Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.1992. Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro 1992. <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm> [Consulta: junio de 2017].

Recientemente en la Cumbre de París sobre el Cambio Climático, en 2015. Los acuerdos derivados de esta reunión se pueden resumir en cuatro cuestiones, siendo una de ellas el de Mitigación: El principal instrumento sobre el que se construye el acuerdo son las llamadas contribuciones nacionales. (Cambio climático: 12 claves de la cumbre de París. 2015. EL PAÍS, Edición América, del martes 31 de enero de 2017).

Este trabajo pretende, y dentro de sus objetivos lo declara, hacer una contribución para mitigar el Cambio Climático (C.C.), mejorar la Calidad de la Distribución y/o Comercialización de los Alimentos (C.D/C. A), así como disminuir las pérdidas debido a la deficiente manipulación de estos.

Declara, además, dentro de sus objetivos, la utilización responsable de materiales biológicos, en este caso Subproductos Agrícolas (S.A) derivados de las operaciones de cosecha, beneficio e industrialización.

Este trabajo forma parte de una Serie de Resultados Divulgativos (S.R.D) relacionados con el tema, que en este caso es el primero, de ahí el I en el título del trabajo.

En este se plantea un Sistema Generalizado de Medición (S.G.M) para la Protocolización de las Observaciones, la Experimentación, la Recopilación de Datos, y su Procesamiento, para finalmente ofrecer una contribución, viable económica, social y medioambiental.

2 Desarrollo

Las acciones desmedidas del hombre sobre la naturaleza, y el aumento de la población mundial traen consigo diversos fenómenos que se manifiestan en un acelerado Cambio Climático (C.C) que afecta a todas las especies vivientes en el planeta.

Efecto directo de esta aberración se manifiesta en el incontrolado manejo de los alimentos provenientes del campo, estos que, debido a una infructuosa administración sufren pérdidas durante su manipulación primaria de cosecha, operaciones postcosecha, almacenamiento, y conservación con características violentas, además de su errónea presentación en las subastas, contribuyen a las ineficaces operaciones unitarias establecidas entre la producción, la comercialización y el consumidor. <https://www.fao.org/docrep/016/i2697s/i2697s03.pdf> [Consulta: agosto 2017].

Este es un periodo muy variable para la producción primaria, como consecuencia de factores intrínsecos (fisiología de las plantas, animales, su edad, especie o variedad, contenido de agua, grado de madurez, tamaño e integridad de cada uno de ellos) y extrínsecos (temperatura, humedad relativa, daños mecánicos, empaque, almacenamiento y transporte) de cada especie. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2016. https:// www.fao.org/food-loss-and-food-waste/es/.

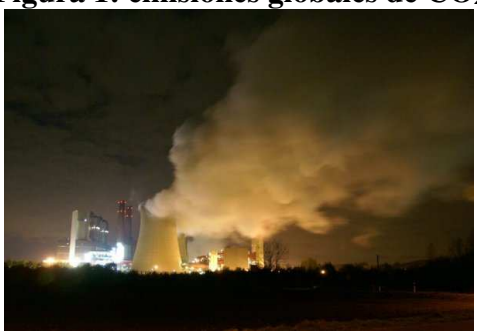
De aquí que este trabajo tenga como objetivos fundamentales los siguientes:

1. A partir de Subproductos Agrícolas (S.A) obtener un Material Biodegradable (M.B) con Características y Propiedades Físico-Mecánicas capaces de sustituir los empleados actualmente para el Manejo de los Productos del sector primario, pudiéndose extender a otros sectores de la economía.
2. Ofrecer, al Sector Primario de la Producción (S.P.P), otra alternativa de ingreso adicional, y que este contribuya a una disciplina e higiene medio ambiental, y además, enfocada como otra alternativa de negocio.
3. Obtener el reconocimiento Nacional e Internacional de la alternativa propuesta, conteniendo la capacidad y robustez suficiente para su generalización.

La población del planeta aumentará de manera espectacular en las regiones más pobres del mundo, advierte la ONU. En el año 2028 la India se convertirá en el país más poblado del mundo superando a China. En total los países en desarrollo experimentarán un crecimiento de 2.300 millones de personas hasta el año 2050, mientras que la población de las regiones desarrolladas seguirá estable. Población. Una población en crecimiento. 2011. <http://www.un.org/es/globalissues/population/> [Consulta: junio de 2017]

La pérdida de los bosques, la contaminación de los ríos, lagos y océanos, la acumulación de gases invernadero, como se muestra en la Figura 1, y la destrucción de la capa de ozono, son consecuencia derivada de la política llevada a cabo por los gobiernos. La pobreza ha conducido a una sobre explotación de los recursos naturales, y por esto estamos en una espiral donde la pobreza contribuye directamente a un crecimiento de la población.

Figura 1: emisiones globales de CO_2



Fonte: Instituto de Estudios Transnacionales, INET. 2008.

Las emisiones globales de dióxido de carbono (CO2), principal gas responsable del Cambio Climático altera los proceden principalmente de la quema de carbón, petróleo y gas natural:

- El carbón, que se utiliza principalmente para la generación de electricidad, representa el 44% de las emisiones de CO2 procedentes de los combustibles fósiles a nivel mundial.
- Petróleo, que se utiliza principalmente para el transporte, representa el 36% de las emisiones de CO2.
- El gas natural, que se utiliza para la electricidad y la calefacción, explica el 20% restante de las emisiones de CO2.
- A nivel mundial, los subsidios a los combustibles fósiles superaron 620 mil millones dólares en 2011, mientras que la energía renovable recibió sólo $88 mil millones de subsidios.
- Desde la Revolución Industrial, el planeta se ha calentado en aproximadamente un grado.
- 2013 marcó el 37º año consecutivo de temperaturas superiores a la media. 4,000 millones de habitantes actuales de la Tierra nunca han experimentado un año que estaba más fresco que el promedio del último siglo.
- Si seguimos haciendo lo de siempre, quemando cada vez más petróleo, carbón y gas natural, se prevé que la temperatura media mundial aumente unos 6ºC a finales de este siglo.
- Además de más sequía generalizada y más numerosos incendios forestales, cambio climático trae más olas de calor extremas.

- En los últimos años se han roto muchos récords de temperaturas cálidas extremas, muchos de ellos en 2010 que se batió el máximo de Asia.
- En cultivos hay una regla de oro que por cada aumento de por cada 1ºC por encima de la media durante la temporada de crecimiento disminuye un 10% los rendimientos del trigo, el arroz y de maíz. Las pruebas de campo muestran que esta regla puede ser conservadora.
- Durante este siglo, si los océanos continúan calentándose y el hielo continúa derritiéndose, se prevé que el nivel del mar se eleve a unos 2 metros, inundando ciudades costeras de todo el mundo, como Nueva York, Londres y El Cairo, y los focos agrícolas, como los deltas fluviales de cultivo de arroz.
- Desde el mes de abril la concentración de CO2 en la atmósfera ha rebasado varias veces las 400 ppm.
- El mes de mayo pasado ha sido el más caluroso jamás registrado instrumentalmente.
- Por último, las observaciones indican que estamos ante la aparición del fenómeno de El Niño, por lo que en 2014 y/o 2015 pueden romper el récord de año más cálido registrado.

La población mundial aumentará en 1.000 millones para 2030. O.N.U. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. 21 de junio 2017, Nueva York. <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-html> [Consulta: junio de 2017]

Los Eventos climáticos extremos. Por no usar otra denominación, algunos sucesos extremos de los últimos años que nos han dejado boquiabiertos han sido la mega inundación en Nueva Orleans por el huracán Katrina, la magnitud del huracán Sandy y los daños causados, las olas de frío que golpearon casi a todo Estados Unidos con temperaturas jamás registradas.

Justamente en estos días pasó México y la humanidad en sí, un gran susto cuando de la noche a la mañana una tormenta tropical se convirtió en un huracán categoría 5, el “Huracán Patricia” y amenazaba con destrucción inminente al país. Gracias a Dios, en cuestión de horas se degradó produciendo lluvias y siendo una tormenta.

En Asia, aún queda en nuestra retina lo sucedido en Filipinas cuando el tifón Haiyán borró pueblos enteros con una furia total. Los incendios forestales en Australia o en California que con más frecuencia ocurren y que nos dejan consternados al ver un infierno que destruye todo ante su paso.

Las olas de calor, extraordinarias, que no hace muchos años atrás se cobró con la vida de miles de personas en Europa que ni se imaginaban que podría suceder, y así, podríamos seguir nombrando hasta el cansancio lo sucedido.

La educación es el pilar más fuerte y una herramienta contra la desidia global. Las soluciones o las medidas para revertir el proceso de deterioro ambiental difícilmente vendrán de la clase política o de los conglomerados económicos que tienen muchos intereses.

La educación deberá partir por exigencia nuestra, ejerciendo nuestros derechos básicos, elementales, en todo estamento público y privado. Desde la escuela, al hogar al estado y todo nicho que la sociedad tiene.

Ciudadanos educados son sinónimo de personas concientizadas que vamos por mal camino y que esos fenómenos naturales que con mayor frecuencia y fuerza ocurren deben ser considerados para reducirlos. Al fin y al cabo, puede que tú, quien nos honra leyendo esta nota estés cómodamente sentado en una ciudad, mientras millones de personas están perdiendo sus cosechas con las que te alimentas día a día.

Figura 2: sequía en Dadaab, Kenia en 2011

Figura 3: imagen satelital del huracán Katrina

Fonte: https://www.nuevatribuna.es/articulo/medio-ambiente/frica-se-muere-de-sed [Consulta: junio de 2017]

La escasez de agua afecta ya a todos los continentes. Cerca de 1.200 millones de personas, casi una quinta parte de la población mundial vive en áreas de escasez física de agua, mientras que 500 millones se aproximan a esta situación. Otros 1.600 millones, alrededor de un cuarto de la población mundial, se enfrentan a situaciones de escasez económica de agua, donde los países carecen de la infraestructura necesaria para transportar el agua desde ríos y acuíferos.

La escasez de agua constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI al que se están enfrentando ya numerosas sociedades de todo el mundo. A lo largo del último siglo, el uso y consumo de agua creció a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población y, aunque no se puede hablar de escasez hídrica a nivel global, va en aumento el número de regiones con niveles crónicos de carencia de agua.

La escasez de agua es un fenómeno no solo natural sino también causado por la acción del ser humano.

De todas las crisis sociales y naturales que debemos afrontar los seres humanos, la de los recursos hídricos es la que más afecta a nuestra propia supervivencia y a la del planeta.

Dentro de las operaciones primarias para la comercialización de los bienes agropecuarios, una vez que los comerciantes compran a los agricultores la producción, a menudo tienen que limpiarla, clasificarla, y empacarla adecuadamente para transportarla hasta distancias lejanas y poder venderlas en el mercado mayorista o en otros lugares. Esto implica varios gastos, incluyendo los costos de mano de obra y los costos de empaque. En algunas ocasiones el comerciante es propietario de las instalaciones donde se hacen los empaques, así como la propia actividad de empacado de los productos, costo que también debe ser considerado.

Figura 4: La escasez de agua es un fenómeno no solo natural sino también causado por la acción del ser humano.

Fonte: http: www.nuevatribuna.es/articulo/medio-ambiente/frica-se-muere-de-sed [Consulta 23 junio 2017]

Figura 5: Crisis hídrica. Eventos naturales

Fonte: http://www.un.org/esa/ [Consulta: 17 junio de 2017]

Los sectores económicos de la producción son la división de la actividad económica de un Estado o territorio en los sectores primario, secundario, terciario y cuaternario.

El sector primario lo forman las relacionadas con la recolección o extracción y transformación de los productos con poca o ninguna manipulación. Las principales actividades del sector primario lo constituyen la agricultura, la ganadería, la silvicultura, la apicultura, la acuicultura, la caza, la pesca, la explotación forestal y la minería. Usualmente, los productos primarios son utilizados como materia prima en las producciones. De aquí, que nos ocupa en este trabajo, el alcance hacia el primer sector, hasta el de la transformación y el consumo. En estos está, de manera muy marcada e importante, el manejo mediante el empacado, el que debe cumplir con requisitos y exigencias técnicas adecuadas para cada tipo de producto, ya sea primario y/o de la transformación con destino comercial.

Con frecuencia los comerciantes son acusados por agricultores, extensionistas, políticos, etc.

de explotar a los agricultores. Ocasionalmente tales acusaciones se justifican. Sin embargo, en muchas oportunidades las grandes diferencias que se presentan entre los precios de compra de los comerciantes y sus precios de venta se explican por sus costos de comercialización.

Los siguientes son ejemplos de esos costos:

- Preparación y empaque;
- Manipulación;
- Transporte;
- Pérdidas;
- Almacenamiento;
- Procesamiento;
- Financieros;
- Tarifas, comisiones, o pagos no oficiales.

Hoy según reportes, técnicos y económicos, gran porciento de la producción primaria, referida a la agrícola sufre pérdidas debido al cambio climático, prevé INE pérdidas agrícolas en México hasta por $22 mil millones debido al cambio climático (La Jornada. 29 de diciembre de 2009), y al mal manejo de las operaciones de cosecha y postcosecha. La transportación interna en la huerta, el inadecuado acopio de la fruta y el transporte a granel contribuyen considerablemente con los daños, a los que se suman los ocasionados por plagas de insectos (30%), los derivados de las operaciones de cosecha (40%) y los relativos al transporte del campo a la Central de Abasto (30%). En Junio, 2001, y fundamentado en los reportes técnicos, la observación en campo, en entrevistas con personas claves y de la sociedad, entre otras fuentes. Concluimos que gran porciento de las perdidas agrícolas están motivadas por causas inherentes al escaso y deficiente condiciones de manejo integral de los productos agrícolas, desde el campo hasta su presentación en anaquel.

En el Ciclo: *Campo-Cosecha-Transpote-Acopio-Beneficio-Industrializción-Almacenamiento-Transporte-Anaquel,* en el que están presente Operaciones Primarias, Secundaras y Terciarias son empleados los empaques.

Estos empaques, por su importante y función dentro del Ciclo y/o Procesos Unitarios que forman parte de la cadena Campo-Comercio cumplen encargos muy específicos en cada eslabón de este, estos pueden ser desde *Contener, Retener y/o Proteger* la mercancía, son generalmente, fabricados de materiales tales como: Plásticos, Madera, Cartón a Base de Celulosa (Papel), Metálicos, Vidrio, Yute, entre otros Los materiales, con los que son fabricados estos empaques, son generalmente, muy difíciles y/o tardados en biodegradarse, es decir, en incorporarse al

Medio Ambiente (M.A), lo que evidentemente contribuyen a la contaminación del M.A e influyen en el Cambio Climático (C.C).

Figura 6: Tipos de envases

Fonte: https://sites.google.com/site/tiposenvases [Consulta: junio de 2017]

Opciones amigables con el M.A son las que se demandan socialmente, las que están recogidas en los acuerdos recientes de las naciones, como son los casos de Rio 1992, Kioto 1997, y París 2015,

Figura 7: Logos de las conferencias climáticas

Fonte: www.ecured.cu/index.php [Consulta: junio de 2017];
https://chrismielost.blogspot.com/2011/12/del-protocolo-de-kioto [Consulta: junio de 2017];
www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120 [Consulta: junio de 2017]

Un sector primario capaz de generar un excedente de producción permanentemente es indispensable para el desarrollo económico sostenido.

Una contribución nacional para M.C.C es la utilización de subproductos generados por la agricultura y su posterior industrialización, en tales casos como:

Figura 8: Materias primas que fundamentan el trabajo.

1-Piña 2-Agave 3-Copra de arroz. 4-Plátano 5- Cascarilla

Fonte: https://exoticfruitbox.com/es/frutas-tropicales/ [Consulta: junio de 2017];
https://exoticfruitbox.com/es/salud/frutas-tropicales-alimentacion/ [Consulta: junio de 2017]

Esta contribución, encuentra su impacto en la calidad de los Productos Biológicos (P.B) durante el manejo de estos, de aquí que la garantía de una comercialización con atributos aceptables que demanda la sociedad esté asegurada.

Los subproductos, provenientes de estos materiales, tienen propiedades biodegradables.

Un material o sustancia biodegradable es aquel que puede descomponerse en los elementos químicos que lo conforman, debido a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales.

No todas las sustancias son biodegradables bajo condiciones ambientales naturales. A dichas sustancias se les llama sustancias recalcitrantes. La velocidad de biodegradación de las sustancias depende de varios factores, principalmente de la estabilidad que presenta su molécula, del medio en el que se encuentran, que les permite estar biodisponibles para los agentes biológicos y de las enzimas de dichos agentes.

La biodegradación es la característica de algunas sustancias químicas de poder ser utilizadas como sustrato por microorganismos, que las emplean para producir energía (por respiración celular) y crear otras sustancias como aminoácidos, nuevos tejidos y nuevos organismos.

La sustitución de algunos materiales empleados actualmente durante el manejo de los P. B, indudablemente contribuirían a:

1. Disminuir la contaminación ambiental a través de la utilización responsable de materiales naturales.
2. Reducción significativa del empleo de la celulosa (papel), y otros materiales en la fabricación de los empaques agrícolas.
3. Se logra un proceso sustentable de las Materias Primas.
4. Aporte de un valor agregado y, agradable presentación de/a los productos comercializados.
5. Posibilidad de generalización del desarrollo a otros sectores de la economía.
6. Al ser otra alternativa comercial para la producción primaria, éste constituiría otra fuente de ingreso doméstico para los productores.

En el manejo agrícola, los empaques, por sus aplicaciones, función, y materiales de fabricación se clasifican en:

Figura 9: Tipos de empaques vigentes.

1. Rústicos 2. Ordinarios 3. Industriales. 4. Seductores

Legenda:

1. Rústicos. Empleados en las labores primarias de la producción, es decir, en el campo.
2. Ordinarios. Se aplican en el proceso de acopio, almacenaje y/o muestras en anaquel.
3. Industriales. Aplicados durante la comercialización y/o presentación formal y profesional del producto
4. Seductores. Es una presentación sugerente en el mercado para motivar su consumo.

Fonte: www.fao.org/Wairdocs/X5403S/x5403s07.htm [Consulta: junio de 2017]

La disponibilidad de Materia Prima que Garantiza la Sustentabilidad de esta contribución está de manifiesto en la cantidad de producción anual, por ejemplo, en la campaña 2015, Tabla 1.

En conjunto, son 16 estados los que participan permanentemente en la producción de los cultivos requeridos para la contribución, es por ello que la disponibilidad de materia prima tendrá una oferta anual permanente.

El proceso de experimentación estará diseñado, de manera tal que esté conformado por un Sistema Generalizado de Medición (S.G.M), en el que se incluyan las principales variables de influencia en los procesos unitarios de producción.

Tabla 1. Resultados de la producción del año 2015 para los cultivos proveedores de materia prima.

PRODUCTO (anual/total)	Sup. Sembrada (ha. 2015)	Sup. Cosechada (ha. 2015)	Producción (ton. 2015)
PIÑA	40,719.40	18,865.40	840,486.46
AGAVE	108,119.83	21,731.41	1,846,345.07
PLATANO	79,182.20	77,548.95	2,262,028.25
COPRA	127,277.31	124,240.31	208,430.02
ARROZ PLAY	42,310.56	40,637.56	236,017.92
Total Nacional	397,609.30	283,023.63	5,393,307.72

Fonte: Serie de datos. SIAT. 2017. [Consulta: junio de 2017]

El proceso de pruebas y ensayos se enfoca hacia la obtención de un vasto y robusto producto con propiedades mecánicas y tecnológicas que se ajusten a las explotaciones agrícolas, y que conserve sus propiedades químicas naturales de Biodegradación en el tiempo.

Ensayos al Material.

1. Ensayos Físicos. En los que se cuantifiquen la densidad, el punto de ebullición, el punto de fusión, la conductividad eléctrica y la térmica,
2. Ensayos Químicos. Que permitan conocer la composición cualitativa y cuantitativa de los materiales, la naturaleza de sus enlaces y la estabilidad de estos en presencia de líquidos o gases corrosivos.
3. Ensayos Mecanográficos. Los que consisten en analizar la estructura interna del material con observaciones mediante microscopios.mp

Ensayos Mecánicos y/o Tecnológicos.

1. Ensayos de Tracción. Es la manera de medir la tenacidad de los materiales, consistente en realizar un ensayo de tracción simple en el que la velocidad de aplicación de la fuerza sea alta. En este ensayo el área comprendida entre la curva de esfuerzos y el eje de abscisas representa el trabajo necesario para romper el material. Este trabajo dividido por el volumen de la probeta utilizada proporcionara la medida de su tenacidad al impacto.
2. Ensayos de Compresión. El ensayo de se realizará para determinar las propiedades de estos materiales frente a una solicitación axial negativa. Solicitación que pretende comprimir las probetas de ensayo.
3. Ensayos de Flexión por choque. El más utilizado será el ensayo de resiliencia, también conocido como ensayo Charpy. En este ensayo se instalará de una probeta de sección cuadrada de 10 x 10 mm y 55 mm de longitud, en cuya parte central se le ha realizado previamente una entalla de 2 mm de profundidad en forma de U o V, con un fondo cilíndrico de 0,25 mm de radio.
4. Ensayos de Cizallamiento. Experimentalmente el módulo elástico transversal (o módulo cortante) puede medirse de varios modos, conceptualmente, la forma más sencilla es considerar un cubo, probeta del material, y luego someterlo a una fuerza cortante, en este, para pequeñas deformaciones se puede calcular la razón entre la tensión y la distorsión angular.

5. Ensayos de Impacto. En estos ensayos las cargas actuarán instantáneamente para medir la resistencia al choque o la tenacidad de los materiales. Estos ensayos se diferencian según la velocidad de aplicación de las fuerzas.
6. Ensayos de Fricción. La fuerza de fricción o la fuerza de rozamiento es la fuerza que existe entre dos superficies en contacto, que se opone al movimiento relativo entre ambas superficies (fuerza de fricción dinámica) o a la fuerza que se opone al inicio del deslizamiento (fuerza de fricción estática).
7. Pruebas y/o Ensayos Bioquímicos. Los ensayos bioquímicos tradicionalmente utilizados, llamadas pruebas bioquímicas convencionales, generalmente determinan la actividad de una vía metabólica (conjunto de reacciones químicas) a partir de un sustrato que se incorpora en un medio de cultivo y que la bacteria al crecer transforma o no. En estos ensayos, en correspondencia con los materiales, se estudiarán los tipos de cepas más característicos, así como el tiempo de Biodegradación del medio.
8. Ensayos Térmicos. Pruebas relacionadas con las Buenas Prácticas Agrícolas en el campo, la cosecha, durante la manipulación y el manejo postcosecha, durante su beneficio, la transportación y conservación, así como su tiempo de anaquel.
9. Pruebas Hidráulicas.
10. Pruebas de Hermeticidad bajo diferentes condiciones térmicas e hídricas para diversos tipos de líquidos y flujos, y su tiempo de exposición.

Tabla 2. Etapas. Secuencia Experimental.

ETAPA	MECÁNICOS Y TECNOLÓGICOS	OBSERVACIONES Y/O ENSAYOS
I		Físicos Mecanográficos
II	Térmicos	Físicos
III		Físicos Mecanográficos
IV	Químicos	Químicos Bioquímicos Microbiológicos
V	Tracción Compresión Fricción	Físicos Mecanográficos
VI	Flexión por Choque Impacto Tracción Compresión Cizallamiento	Térmicos Hidráulico Hermeticidad Físicos Mecanográficos Microbiológicos

Tabla 3. Pruebas y/o Ensayos vs Tiempo.

ETAPA	ACTIVIDAD
I	Trituración Primaria
II	Deshidratado
III	Trituración Secundaria y Mullido
IV	Mezclado y Aplicación de Aditivos Aglutinantes
V	Surtido y Laminado Mecánico
VI	Conformado Laminar

Gestión Administrativo/Legal.

- Gestión de Reconocimientos: Patentes y/o Modelo de Utilidad.
- Fundamentación de Alternativa de Ingreso a Productores; fundamentación técnico-Económica para los productores.

3 Conclusiones

Los resultados esperados, de acuerdo con la fundamentación de las necesidades actuales relacionadas con, el Cambio Climático, el Manejo Agrícola de la Postcosecha, los Costos de Comercialización y su Calidad, así como de la disponibilidad de la Materia Prima, hacen del proyecto una alternativa viable de aporte a la solución de los problemas anteriores.

Este constituye, una propuesta de alternativa productiva de interés económico, social, y de impacto para la mitigación del Calentamiento Global.

El Sistema Generalizado de Medición propuesto (S.G.M), responde a las exigencias Técnico-Económicas y Legales del aporte.

4 Referências

Andrade M., Laporta P. 2009. La teoría social del riesgo. Una primera aproximación a la vulnerabilidad social de los productores agropecuarios del Sudoeste bonaerense ante eventos climáticos adversos. Mundo Agrario: Revista de Estudios Rurales, 19.

Arias, C. (2007). Manual de manejo postcosecha de frutas tropicales. Organización de las naciones anidadas para la agricultura y la alimentación (FAO).

Barrios, F. (2011). Manual de buenas prácticas de manejo poscosecha y transporte (BPPC/T). San salvador.

Blandón, S. (n.d). Eco fisiología de poscosecha de frutas y hortalizas.

Bohórquez, O. (2005). Guía para post cosecha y mercadeo de productos agrícolas. (L. Acero, L. Rodríguez, & H. Bernal, Edits.) Serie ciencia y tecnología (118), 36.

Barsky A.; Podestá G.; Ruiz Toranzo F. 2008. Percepción de variabilidad climática, uso de información y estrategias de los agentes frente al riesgo. Análisis de esquemas decisionales en agricultores de la región pampeana argentina. Mundo Agrario: Revista de Estudios Rurales, 16.

Bartolomé M., Caputo M., Celis A., Herzer H. y Rodríguez C. 2004. El clima y otros factores de riesgo productivo en la pampa húmeda Argentina. Realidad Económica 202, 88:107.

Bartsch, J. A., y R. Kline. Produce Handling for Direct Marketing [Manejo del Producto para Comercialización Directa]. Ithaca, N.Y.: Northeast Agricultural Engineering Service [Servicio de Ingeniería Agrícola del Noreste], 1992.

Dunn, J. W., J. W. Berry, L. F. Kime, R. M. Harsh, y J. K. Harper. Agricultural Alternatives: Developing a Roadside Market [Alternativas Agrícolas: Desarrollando un Mercado al Borde de la Carretera]: University Park: The Pennsylvania State University [Universidad Estatal de Pensilvania], 2006.

Dunn, J.W., J. K. Harper, y L. F. Kime. Agricultural Alternatives: Cooperatives [Alternativas Agrícolas: Cooperativas]. University Park: The Pennsylvania State University [Universidad Estatal de Pensilvania], 2005.

German, C., et al. Guide to Planning the Farm Retail Market [Guía para la Planificación de un Mercado de Granja al Detal]. Newark: University of Delaware Cooperative Extension Service Agricultural Experiment Station [Estación Experimental Agrícola de la Extensión Cooperativa de la Universidad de Delaware, 1994.], 1994.

Fao. (2002). Poscosecha y servicios de apoyo a la comercialización. IICA/PRODAR.

García, F., Roselló, J., & Santa marina, P. (2006). Introducción al funcionamiento de las plantas. Valencia, España: Editorial de la UPV.

Martínez, A., Lee, R., Chaparro, D., & Páramo, S. (2003). Postcosecha y mercado de hortalizas de clima frio bajo prácticas de producción sostenible. (H. Colmenares, Ed.) Bogotá, Colombia.

Cantwell, M. (n.d). Manejo postcosecha de productos hortofrutícolas. Universidad de California Davis.

Sadava, Heller, Orians, Purves, & Hillis. (2008). Vida: la ciencia de la biología. Madrid, España: Médica panamericana S.A.

Sagarpa. (2003). Manual de almacenamiento y transporte de frutas y hortalizas frescas en materia de inocuidad. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, México.

<http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec_36.asp?cuaderno=36>[Consulta: junio de 2017]

<http://ingenierosdeminas.org/docu/documentos/fundamentos_%20biorremediacion.pdf>[Consulta: junio de 2017]

<http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Biodegrada.htm>[Consulta: junio de 2017]

<http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p422.pdf>[Consulta: junio de 2017]

<http://www.todoenplastico.com/noticias/noticia.asp?id_noticia=34>>>[Consulta: junio de 2017]

<http://www.santafeonicet.gov.ar/servicios/comunica/petroleo.htm>[Consulta: junio de 2017]

<http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/HidrocBiod.htm>[Consulta: junio de 2017]

<http://www1.serbi.luz.ve/ojs.3.4/index.php/bcib/article/view/142>[Consulta: junio de 2017]

Authors Profiles:

Vladimir Berenguer Pina: Doctorado en Problemas Económicos Agroindustriales en 2005 por la Universidad Autónoma Chapingo, México y graduado de Ingeniería Mecánica Agrícola por la Universidad Agraria de Ciego de Ávila, Cuba en 1986. Su área de trabajo académica es en Metrológica Mecánica Agrícola, y de investigación en el Manejo de la Calidad de los Productos Agrícolas. Tiene experiencia en el área del diseño mecánico agrícola donde ha realizado aportes en los cultivos de Piña, Café, los pastos y los Forrajes.

Martín Hidalgo Reyes: Doctorado por el Instituto Politécnico Nacional, México en 2008 en el área de Ingeniería Mecánica, desempeñándose en Materiales Biocompuestos. como académico está vinculado a la esfera del Diseño Mecánico y la Manufactura de los Materiales.

Technical and economic feasibility of co processing of meat and bone meal in a cement factory in Brazil

Ricardo de Lima Silva
Ricardo.lima@ifmg.edu.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

Ricardo Carrasco Carpio
ricardo.carpio@ifmg.edu.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

Abstract:
Carcasses of animals and animal by-products do not have adequate environmental regulations in relation to their disposal in Brazil. The highest occurrence clandestine animal slaughter and the improper disposal of rejected animal by-products are major environmental and public health problems. Mortalities caused by accidents, diseases and electric discharges also generate environmental liabilities by not collecting and disposing of them correctly. In other countries this waste has specific regulations and classification to be co-processed as alternative fuel in the cement industry, being burned in the form of meat and bone meal. The objective of this work is to conduct a study of the technical and economic feasibility of co-processing meat and bone meal in a cement factory in the Midwest region of the state of Minas Gerais, located in Brazil. The processes of production of meat-and-bone meal, destined for cement factories, and tallow destined to the production of biodiesel, were developed. It is concluded that the construction of the new processing unit for animal mortalities and by-products is viable, and the financial impact of the introduction of meat-and-bone meal for co-processing in the cement plant is favorable, demonstrating the possibility of environmental, social gains and economical for the region.

Keywords: Waste co-processing; cement kiln; meat and bone meal; feasibility study; Alternative fuel.

1 Introduction

Co-processing of waste as alternative fuels is an effective option for proper disposal and for reducing consumption of non-renewable resources. Waste derived fuels often have lower calorific value (LCV) minor than fossil fuels. It may be necessary to add a lot of thermal energy to achieve the proper operating temperatures.

Due to the characteristics of the cement kiln, which operate at high temperatures and have adequate residence time, they are one of the major waste coprocessors of non-renewable fuels.

The high temperature promote the destruction of the residues and the incorporation of the ashes of the residue in the cement, not resulting in environmental liabilities at the end of the process.

Co-processing technologies in cement plants are regulated and consolidated, eliminating properly large amounts of waste at extensive production chain.

One of the large-scale co-processed wastes in Europe and the USA is Meat and Bone Meal (MBM), which comes from the animal by-products processing industry, slaughterhouses, farms and disaster mortalities.

The industry of animal by-products represents a potentially polluting activity and can cause significant environmental impacts. The major producers in the sector have waste disposal programs, but many small producers still dump large volumes of waste directly into the environment.

To co-processing MBM on the cement plant, the technical conditions for receiving, processing, transport, storage and injection should be analyzed and compared with data from other alternative fuels. In the case of industrial processes, the economic conditions should be evaluated in view of the investments to be made, considering the costs of processing and transporting the new alternative fuel.

Animal recycling industries in Brazil usually process only animal byproducts on category 3, for food and cosmetic purposes. Europe and USA has regulations and laws to processing byproducts and tailings from animal mortalities (dead carcasses) classified on category 1 and 2 for co-processing, as well as category 3.

In order to make feasible the coprocess of MBM produced from tailings rating 1 and 2 at a cement plant, the technical conditions for reception, processing, transportation, storage and injection must be analyzed and compared to data from other alternative fuels.

To make possible to eliminate the mortalities, it was necessary to carry out investment analysis in a new plant to receive this material, to process and supply the MBM with a competitive price compared to the traditional methods currently used, such as composting, incineration or burial.

In order to make feasible the destination of MBM in the cement plant it was necessary to verify the financial impact of this material in relation to the other co-processed wastes currently in the plant.

The research was carried out throughout the production chain, starting with studies on the generation and elimination of mortalities in rural properties, including visits to the processing plant of animal by-products and to the cement plant Minas Gerais - CPMG, located in the Center-West region of the State of Minas Gerais, in Brazil.

National and foreign technologies have been verified in order to adapt the best cost-benefit ratio that is profitable and advantageous to the environment and that can generate income for the local community, verifying the social function of the project.

The study presented satisfactory results, showing feasibility and possibility of being applied in different Brazilian regions.

Bibliography and review

The coprocess of residues as alternative fuels is an effective option for the proper disposal and consumption reduction of non-renewable source fuels. Liquid emission of greenhouse gases can be drastically reduced by replacing traditional fuels with other materials, such as agriculture biomass, urban solid residues (USR), or meat and bone meals (Uson, 2013). The main fossil fuels ("primary" fuels) in the cement industry are coal, petroleum coke, fuel oil and - in minor amount - natural gas (Karstensen, 2010).

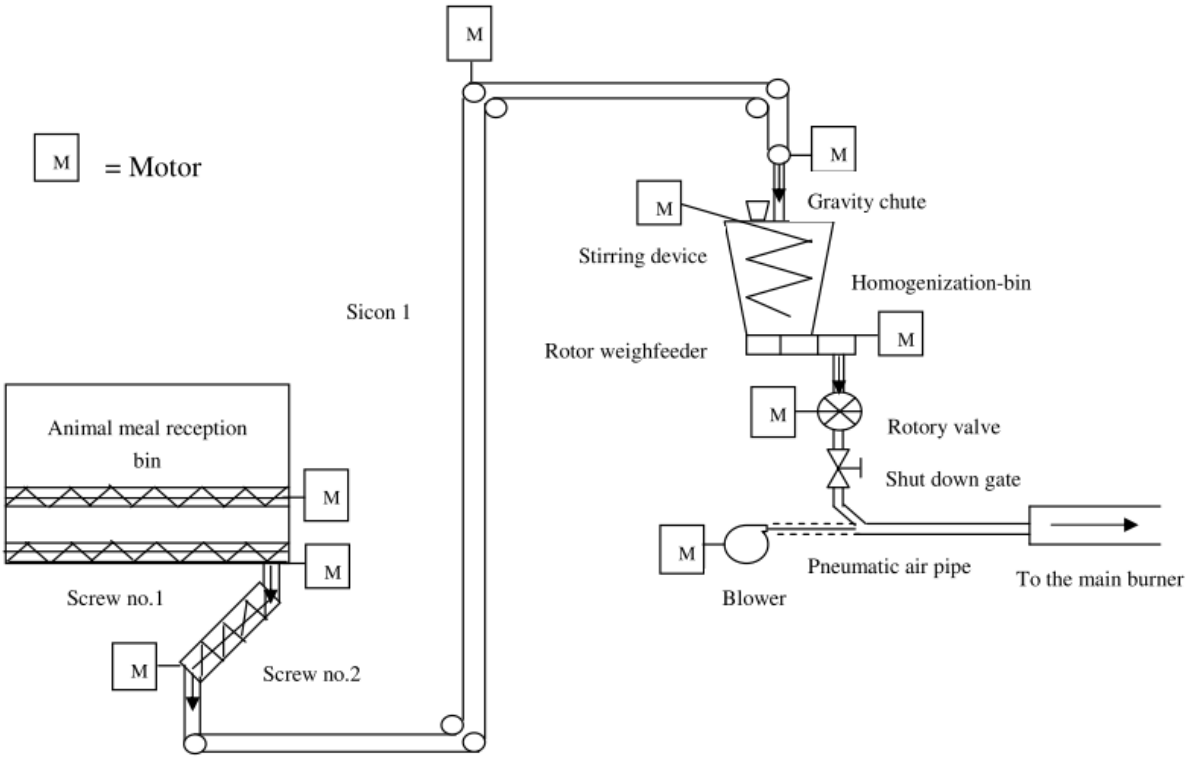
MBM is one of alternative fuels and it can reach 15.7% of the replacement rate at a certain cement facility in Italy (Rahman et al., 2015). However, MBM is not co-processed in Brazil.

Moreover, the financial impact of the material compared to other residues co-processed at the plant must be verified. The MBM dosing and injection process is presented through the diagram in figure 1.

The received animal meal is stored in a reception bin. Then it is fed to a long closed conveying belt by means of push floor dischargers and then two screws. There is a special sensor is located at the end of belt to sense the malfunctions of conveying belt. The material is then directly conveyed to a pre-hopper which is also called calibration bin or homogenization-bin of the rotary weight feeder through a gravity chute. However, the size and design of supply conveyor has to be selected to ensure that the rotor weighfeeder system including homogenization bin is provided with sufficient supply of bulk material with at least 120% of the maximum feed rate (Ariyaratne, 2009). The main fossil fuels ("primary" fuels) in the cement plant are coal, petroleum coke, fuel oil and - in minor amount - natural gas (Karstensen, 2006). Tests of coal and MBM co-combustion, verifying the CO relatively low levels, suggest that the combustion efficiency was highly elevated, especially when MBM was used (Gulyurtlu, et al.,2005). Production operators usually optimize residues mix used at a cement plant based on software and spreadsheets developed for this purpose. It must be considered that the "burning services" or "waste disposal services" solve the generating companies' problem, since fines and foreclosures are avoided by the fulfilment of the law.

Such services provide financial gains to the cement factories; however, there are internal expenses that must be counted, such as: chemical analysis, reception, storage, mixtures, transportation and fuel injection within the process.

Figure 1: Injection process of alternative fuel and MBM at a cement plant diagram.



Source: (Ariyaratne, 2009).

Gulyurtlu et al. (2005) conducted co-combustion tests of coal and MBM, concluding the relatively low CO levels suggest combustion efficiency, particularly when MBM was used. The results are shown in Tab. 1.

Table 1. Properties of coal and MBM.

Property	Coal	MBM
Moisture (wt.%)	1.0	4.0
Volatiles (wt.%)	31.6	60.8
Fixed Carbon (wt.%)	56.3	6.0
Ash (wt.%)	11.1	27.2
P_2O_5 (wt.%)	0.007	13.0
CaO (wt.%)	0.02	13.3
Lower Calorific Value (kcal/kg)	6,689.0	4,423.0
Freely settled density (kg/m^3)	640.0	720.0

Source: Ariyaratne et al., 2010.

The authors used online analyzers, correcting concentrations to 11% O2, in accordance with waste incineration legislation. The same O2 concentration references were used for the

charcoal-only and co-combustion tests with MBM to allow comparison of the tests. Ariyaratne et al. (2010) performed tests with MBM injection in a clinker kiln for 12 hours, varying the feed rate at specific time intervals. In these tests, MBM was fed through to rotary feeder in the production of portland cement.

Table 2. Experimental schedule and thermal energy

Time interval	MBM feeding rate (t/hr)	Coal feeding rate (t/hr)	Energy substitution at main burner (%)
9.00-11.00	0	7.8	0
11.00-13.00	2	2	16.9
13.00-15.00	4	4	33.5
15.00-17.00	6	5	42.4
17.00-19.00	8	6	50.4
19.00-21.00	10	7	59.1

Source: Ariyaratne et al., 2010.

In the experiment, the authors maintained the crude feed rate at 220 t/h. However, the feed rate had to be reduced by 10 t/h in the final stage of the experiment to maintain clinker quality within the desired specification.

The results of the tests were presented in Tab. 1. Tab. 2 shows the experimental schedule and thermal energy replacement by MBM in the main burner, gradually increased by reducing coal supply in order to keep the thermal energy consumption of the kiln at almost constant level

Ariyaratne et al. (2010) concluded that there is a possibility of significant substitution of coal in the main rotary kiln burner without adversely affecting the product quality, production rate and overall emissions of the operation. The authors did not observed significant impacts on the emissions or the operation of the furnace system, regardless of the feed rate of MBM.

According to Pecchio (2013), recent examples of destruction of carcasses from contaminated animals in clinker kilns result in phosphate (P2O5) inputs, since the bones are composed of hydrated calcium phosphate, which is incorporated into the inorganic fraction of clinker raw materials, replacing limestone in part. However, the author explains that there is no consensus regarding the maximum levels of phosphate that can be incorporated into the clinker without compromising its final quality.

2 Experimental Procedure

2.1. Estimation of the MBM quantity obtained from mortalities in the region

The herds of pigs, cattle and poultry were verified in official government statistic data. It was multiplied by the mortality rates, excluding the unusable parts.

The amount of MBM that can be produced in the region using as raw material proteins improper for human and animal consumption (animals injured, hit or struck by lightning) has been verified. The calculated amount of mortalities in the region is 11.7 t/d.

2.2. Co-processed wastes in the cement plant CPMG

The simulation of residues is carried out daily in the cement plant to verify the best mixture of residues as a function of the fuel stock, emission limits of this mixture and the economic gain due to the substitution of conventional fuels.

Figure 2 shows a typical composition of co-processed wastes in the cement plant CPMG.

The proportions of each residue vary according to market availability, calibration of calorific value and chemical analysis performed upon receipt, among other parameters to choose the composition of each mixture.

Figure 3 presents the percentages of the composition of a typical mixture with the main residues co-processed at plant. Consider tons, daily consumption (t/d).

Figure 2. Typical composition of co-processed wastes in the cement plant CPMG.

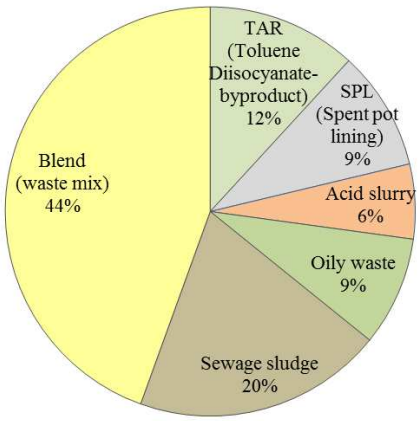
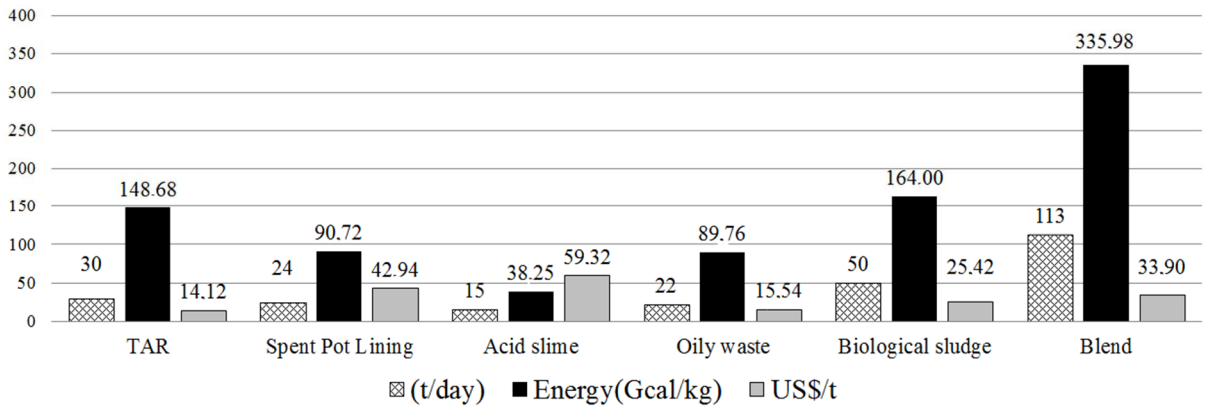


Figure 3. Fuel typical blend: daily production (t/d); energy (Ggal/kg) and price for disposal at plant (US$/t).



2.3 Total Financial Impact (TFI)

The financial viability will be verified concerning the replacement of one residue by MBM, keeping the operational balance of the productive process. Therefore the assessment based on total financial impact (TFI) of the introduction of new alternative fuel was chosen, combine with a typical blend used at the cement plant CPMG, with and without adding MBM.

TFI is the balance resulted from the introduction of fuel, considering the economy gained by the reduction on purchasing fossil fuels as well as by the benefit of the calorific power of the alternative fuels, based on Lower Calorific Value (LCV). It was considered five steps: Calculate Fuel Energy Release (FER), Thermal Input of the Fuel (TIF), Contribution of the Waste Disposal (CWD), benefit and Total Financial Impact (TFI).

Clinker production and fuel consumption are represented in t/d. The benefit, given in US$/ Kcal, is defined in 4.86 and refers to the cost saved by Gcal for not purchasing fossil fuel, in this case the pet coke, which is a commodity. The petcoke benefit value will be 4.86, considering the international price of the fuel under 39.36 US$/ t. (LCV of 8,100 Kcal/kg). The equations are shown below.

Step 01: Calculation of the Fuel Energy Release (FER) by the equation:

$$FER\ (Kcal) = \frac{LCV\ x\ \ residue\ consumption\ \ x\ \ (1 - humidity)}{1000} \qquad (1)$$

Step 02: calculation of the Thermal Input of the Fuel (TIF) by the equation:

$$TIF\ (\frac{US\$}{t} clínquer) = \frac{EFC\ x\ benefício\ x\ custo\ por\ kcal}{production} \quad (2)$$

Clinker production and fuel consumption are represented in t/d. The benefit, given in US$/ Kcal, is defined in 4.86 and refers to the cost saved by Gcal for not purchasing fossil fuel, in this case the petcoke, which is a commodity. The benefit is calculated by the equation:

$$Benefit\ (\frac{US\$}{Kcal}) = \frac{Fuel\ Price}{LCV} \quad (3)$$

Step 04: Calculation of the Contribution of the Waste Disposal (CWD) by the equation:

$$CWD\ \left(\frac{US\$}{t}\right) = \frac{Waste\ comsumption\ x\ disposal\ price}{clinker\ daily\ production} \quad (4)$$

Step 05: Calculation of Total Financial Impact (TFI) by the equation:

$$TFI\ (\frac{US\$}{t} clínquer) = ATC\ (\frac{US\$}{t} clínquer) + ADR\ (\frac{US\$}{t} clínquer) \quad (5)$$

Residue mixture simulation software is frequently used in the cement plant. This software considers a thermal substitution around 25%. This is the percentage of total thermal energy consumed in the clinker manufacturing process being generated by the use of alternative fuel.

3 Total Financial Impact (TFI)

Two simulations of TFI from residues mixing were carried in Total Financial Impact (TFI) at CPMG. The first objective is introduce MBM obtained from waste that is currently released in the Brazilian environment, but could be classified and regulated to be co-processed in Brazilian cement plants. The second objective is to reduce consumption of residue “oily waste”, which has irregular availability.

Usually are injected 254 t/d of alternative fuels into the precalciner (secondary fuel) and in the main burner of the clinker kiln (primary fuel).

Applying the equations shown, we can verify in each ton of clinker produced with alternative fuels, the total value of US $ 5.28 is earned in the current conditions, considering the main co-processed wastes in the plant. The results are shown on Tab. 3.

Table 3. Total financial impact (TFI), considering 22 t/d of oily waste and without addition of MBM

Alternative fuel	Consumption (t/d)	TIF (US$/t clinker)	CWD (US$/t clinker)	TFI (US$/t clinker)
TAR	30	0.32	0.19	0.50
SPL	24	0.19	0.45	0.65
Acid Slurry	15	0.08	0.39	0.47
Oily waste	22	0.19	0.15	0.34
Biological sludge	50	0.35	0.56	0.91
Blend	113	0.72	1.68	2.40
Total:	254			5.28

The TFI of the composition which includes reduces 11.7 t/d of oily waste and increase 11.7 t/d of MBM results TFI U$$ 5.37/t, as shown in the Tab. 4. When 11.7 t/d of MBM are added to a composition of co-processed residues at plant, the TFI can increase US$ 0.09 US$/t clinker. Multiplying to production of 2,274.00 t/d clinker, the annual income would be US$ 74,700.09.

In the co-processing of residues on the CPMG the reduction of 11.7 t/d of oily waste and introduce MBM is advantageous from the financial perspective, according to the TFI calculation.

The MBM introduced will replace the oily waste and contaminated soil, whose availability varies on the market, making supplies irregular. The production of such residues and soil occur when there are accidental oil spills or cleaning of contaminated area, which are sporadic and unwanted situations to the environment.

Table 4. Total financial Impact (TFI) reducing 11.7 t/d of oily waste, introducing 11.7 t/d of MBM.

Alternative fuel	Consumption (t/d)	TIF (US$/t clinker)	CWD (US$/t clinker)	TFI (US$/t clinker)
TAR	30	0.32	0.19	0.50
SPL	24	0.19	0.45	0.65
Acid Slurry	15	0.08	0.56	0.64
MBM	11.7	0.11	0	0.11
Oily waste	10.3	0.09	0.07	0.16
Biological sludge	50	0.35	0.56	0.91
Blend	113	0.72	1.68	1.40
Total:	254			5.37

There are reports about cement plants that invested in co-processing oil residues and ended up having their facilities disabled, without the financial feedback expected.

The national and foreign technologies were verified, in order to adapt the best cost benefit, profitable and advantageous to the environment, as well as generate income to the local community, in the business possibilities of handling and processing MBM category 1 and 2.

"Burning services" or "appropriate waste disposal services" should be considered as solving the problem of generating companies, by avoiding interdictions and penalties for noncompliance to environmental laws. These services generate financial gains for cement plants, but there are internal costs that must be accounted for: chemical analysis, reception, storage, mixing, transportation and fuel injection in the process.

The study presented satisfactory results, showing the viability and possibility of implementation in different regions of Brazil.

4 References

Ariyaratne., W. K. H. Alternative fuels in cement kilns – Characterization and Experiments, 2009. Master's Thesis. Faculty of Technology - Telemark University College, Norway.

Ariyaratne., W. K. H. et al. Meat and bone meal as a renewable energy source in cement kilns: Investigation of optimum feeding rate., 2010. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Spain.

Gulyurtlu, et al. Co-combustion of coal and meat and bone meal., 2005. Fuel, v. 84, n. 17, p. 2040.

Karstensen. K. H. Formation and release of POPs in the cement industry., 2010. World Business Council for Sustainable Development/SINTEF. Available from http://www. wbcsd. org/plugins/DocSearch/details. asp, 2006.

Pecchio, Marcelo. The influence of phosphorus, sulfur and strontium on portland clinker mineralogy., 2013. Ph.D. Thesis. USP - Universidade de São Paulo.

Uson, A. et al. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options., 2013. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 23, p. 249.

Author Profile:

Ricardo de Lima Silva has received Master's degree in Sustainability and Environmental Technologies from the Federal Institute of Education, Science and Technology of Minas Gerais (IFMG) in 2015. Is now an Professor at the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Minas Gerais (IFMG) Campus Betim. His research interests are in the areas of industrial processes working mainly in the following subjects: cement industry, environmental technologies, technical and economic feasibility studies and education.

Ricardo Carrasco Carpio received a Ph.D in Mechanical Engineering from the Universidade Federal de Itajubá in 2005, in the area of Energy Conversion. Is now an Professor of the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Minas Gerais IFMG - campus Arcos and campus Bambui. His research interests are in the areas of Optimization of Thermal Systems and Computational Mechanics, working mainly in the following subjects: cement industry, cogeneration, thermal systems and optimization of Industrial processes.

Avaliação de painéis de média densidade produzidos a partir de resíduos das indústrias de papel e celulose e sucroalcoleira para aplicação estrutural utilizando resina poliuretana

Larissa Queiroz Minillo
larissaminillo@gmail.com
Universidade Estadual Paulista, Brasil

Bruna Bessa Rocha
bessarochaifsp@gmail.com
Universidade Estadual Paulista, Brasil

Sergio Augusto Mello da Silva
sams@dec.feis.unesp.br
Universidade Estadual Paulista, Brasil

Resumo:
No Brasil intensificam-se os estudos visando o aproveitamento de resíduos provenientes de processos industriais com o objetivo de reduzir o impacto ao meio ambiente, minimizando a exploração e o uso de recursos naturais como por exemplo a madeira nativa. Este trabalho avaliou o emprego dos resíduos do descascamento de Eucalyptus urophylla, Eucalyptus grandis e Eucalyptus camaldulensis provenientes de florestas da Indústria Eldorado Brasil - Papel e Celulose e partículas de bagaço da industria Vale do Paraná - álcool e açúcar; para a produção de painéis aglomerados de média densidade (MDP). Os painéis foram confeccionados utilizando-se resinas poliuretanas bi-componetes de dois fornecedores, a Industrial Plural Química de São Carlos e Imperveg de Aguaí, ambas de São Paulo. Foram realizadas avaliações segundo a NBR14810 (2013) visando caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis e os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística pelos métodos de Tukey, Anova e Regressão Linear. Os painéis produzidos com porcentagens de 0 a 30% de resíduo bagaço de cana adicionados ao resíduo de eucalipto apresentaram resultados físicos e mecânicos satisfatórios para utilização como painéis estruturais, e porcentagens de 30 a 50% de resíduo bagaço de cana apresentaram resultados satisfatórios para painéis não estruturais.

Palavras-chave: Painéis de madeira aglomerada, Resíduos da indústria de celulose, Resíduos da indústria sucroalcooleira, Resina poliuretana.

Abstract:
In Brazil, studies have been intensified aiming at the recovery of waste derived from industrial processes in order to reduce its environmental impact by developing new products that are able to minimize the misuse and the exploitation of natural resources such as native wood. This study evaluated the potential use of the waste of Eucalyptus urophylla peeling, Eucalyptus grandis and Eucalyptus camaldulensis from the industry Eldorado - Papel e Celulose and bagasse particles from the alcohol and sugar industry Vale do Paraná for the production of medium density particle boards. The particle boards were built by using bi-component polyurethane resins from two suppliers, Industrial Plural Quimica and Imperveg. Evaluations were carried out in accordance to NBR14810-2013 in order to characterize the physical and mechanical properties of the particle board and the results were then submitted to statistical analysis by means of the Turkey, Anova and Linear Regression methods.

Keywords: particle board, cellulose industry waste, sugar-alcohol industry waste, polyurethane resin.

---

1 Introdução

A madeira, por ser um material versátil, abundante e de fonte renovável, tem diversas utilizações na produção humana, podendo ser proveniente de florestas naturais ou artificiais.

Em função da escassez da matéria-prima, a tecnologia de produção de painéis desenvolveu-se principalmente após a Segunda Guerra Mundial. No Brasil, a produção de painéis de madeira aglomerada teve início na década de 60 e se mostra um grande nicho no século 21, segundo Hellmeister (1983).

A maior parte da madeira consumida na fabricação de painéis de madeira aglomerada, de painéis de fibras de madeira ou de celulose e papel é proveniente de árvores de espécies selecionadas, normalmente pinus e eucalipto, plantadas com essa finalidade em um prazo determinado, geralmente compreendido entre quatro e oito anos de idade da árvore.

O Brasil se destaca no mercado internacional de celulose de eucalipto, com extensas áreas de plantio destas espécies, que superam três milhões de hectares somente para esse segmento, além da quantidade plantada destinada à indústria moveleira. Verificada a abundância de matéria-prima, é preciso dar atenção à quantidade de resíduos gerada pela indústria de celulose e papel e propor alternativas para o reaproveitamento destes resíduos, como por exemplo, utilizá-los na fabricação de painéis aglomerados.

A partir da reconstituição de elementos de madeira é possível obter novos produtos como os compostos laminados e particulados. O primeiro é formado pela sobreposição de lâminas de madeira, já os particulados podem ser obtidos com a reutilização da madeira na forma de minerais, fibras ou aglomerado (Iwakiri, 2005).

Os painéis estruturais são largamente utilizados na construção civil, principalmente nos Estados Unidos. No Brasil os painéis mais produzidos são os de partículas.

Esses painéis são geralmente produzidos a partir de partículas de madeira aglutinadas com adesivos sintéticos ou outro aglomerante, sendo o conjunto prensado a quente por tempo suficiente para que a cura da resina se efetue (Mattos et al, 2008). As resinas comerciais mais utilizadas na produção desses painéis, atualmente, são aquelas à base de fenol-formaldeído e uréia formaldeído (Dias, 2005). Segundo Cohen (1996) tais adesivos liberam formaldeído que é uma substância cancerígena e/ou mutagênica.

A resina poliuretana derivada de óleo de mamona é uma alternativa para eliminar a emissão de formaldeído dos adesivos comerciais utilizados em painéis aglomerados. Produzida a partir de fonte renovável, a resina possui boas propriedades mecânicas e sua produção é viável comercialmente (Dias, 2004).

A princípio, esses painéis podem também ser fabricados a partir de qualquer outro material lignocelulósico que lhes confiram alta resistência mecânica e peso específico preestabelecido, já que a composição química dos materiais lignocelulósicos é semelhante à da madeira.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um estudo sobre o aproveitamento de resíduo de madeira, especificamente do gênero Eucalyptus, oriundo do descascamento das toras de madeiras utilizadas na produção de papel e celulose e partículas provenientes de bagaço de cana-de-açúcar.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Para produção dos painéis foram utilizados resíduos da descascagem do eucalipto doados pela empresa Eldorado Papel e Celulose LTDA, resíduos de bagaço de cana doados pela empresa Vale do Paraná S/A, ambas as duas empresas localizadas no noroeste do estado de São Paulo, Brasil. As duas resinas bicomponentes à base de óleo de mamona foram adquiridas pelas empresas Plural Química LTDA, e Imperveg Polímeros Indústria e Comercio LTDA, situadas no estado de São Paulo, Brasil.

2.2 Métodos

O processo de produção dos painéis iniciou-se com a secagem ao ar livre do material seguido de trituramento no triturador comum de 2 hp, à uma granulometria de 4 mm a 10 mm para o bagaço de cana e de 2 mm a 10 mm para o resíduo de eucalipto.

Com base nos documentos normativos (ABNT NBR 14810-2, 2013), foram confeccionados painéis homogêneos de media densidade (densidade nominal de 0,7 g/cm³), de mesmas dimensões (40x40x1 cm) e de mesma composição granulométrica, com partículas de 2 à 6 mm. Foram utilizadas as resinas poliuretanas à base de mamona na confecção dos painéis na proporção de 10% em relação à massa seca das partículas. Optou-se por estudar as proporções de resíduo, mantendo-se a proporção de 10% de resina, porém variando-se a proporção entre poliol e pré-polímero, de acordo com a tabela 1. Para verificar a existência de diferenças significativas entre as variáveis, foram utilizados os métodos de análise de variância e regressão linear.

Tabela 1 – Tratamentos analisados nomeados de T0 a T5 e suas proporções de materiais constituintes

	Resíduo de eucalipto (g)	*Resíduo de bagaço de cana (g)*	*Proporção entre Poliol e Pré-polimero*
T0	1300 (100%)	0 (0%)	1:1
T1	910 (70%)	390 (30%)	1:1
T2	390 (30%)	910 (70%)	1:1
T3	650 (50%)	650 (50%)	1:1
T4	910 (70%)	390 (30%)	1,5:1
T5	650(50%)	650(50%)	1,5:1

Foram produzidos 3 painéis para cada tratamento e 12 corpos de prova para ensaio. A fabricação dos painéis foi realizada iniciando-se pela homogeneização da resina com os resíduos, sendo esta feita de maneira manual e mecânica, posteriormente com a ajuda de uma formadora de colchão é realizada a pré-prensagem, seguida da prensagem à quente em prensa hidráulica com pressão de 5MPa, temperatura de 100±5°C durante 10 minutos, finalizando-se com a cura em ambiente de temperatura controlada por 48 horas.

Foram produzidos 3 painéis para cada tratamento e 12 corpos de prova para ensaio. A fabricação dos painéis foi realizada iniciando-se pela homogeneização da resina com os resíduos, sendo esta feita de maneira manual e mecânica, posteriormente com a ajuda de uma formadora de colchão é realizada a pré-prensagem, seguida da prensagem à quente em prensa

hidráulica com pressão de 5MPa, temperatura de 100±5°C durante 10 minutos, finalizando-se com a cura em ambiente de temperatura controlada por 48 horas.

3 Resultados e Discussão

3.1 Propriedades Físicas

Foram realizados os ensaios físicos de densidade e umidade aparente à temperatura ambiente, absorção e inchamento dos painéis após 24 horas submerso em agua. A tabela 2 ilustra valores médios dos resultados.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos painéis aglomerados

	Densidade (kg/m³)	*Umidade (%)*	*Inchamento 24h (%)*	*Absorção 24h (%)*
T0	877,47	11,27	19,03	41,23
T1	880,74	8,11	22,16	52,69
T2	934,18	8,10	26,42	61,03
T3	888,00	9,43	17,79	42,99
T4	673,15	8,14	39,91	42,81
T5	771,14	7,65	48,12	40,80

Os valores obtidos para densidade não se diferenciaram significativamente, exceto para o tratamento T2, que se diferencia dos outros significativamente segundo o teste Tukey ao nível de 95% de probabilidade.

Quanto ao teor de umidade, verifica-se que os painéis encontram-se dentro dos valores exigidos pela norma (ABNT NBR 14810-2, 2013) que compreende valores de 5 a 13%. Quanto aos resultados de inchamento, o tratamento T3 apenas encontra-se dentro do valor exigido pela norma. Já para valores de absorção não existem valores comparativos nos documentos normativos, apenas na literatura, onde se espera valores de 20 a 30% (Dias, 2005).

3.2 Propriedades Mecânicas

Na tabela 3 são apresentados os valores médios de modulo de ruptura à flexão, modulo de elasticidade e tração perpendicular.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos painéis aglomerados

	MOR (MPa)	*MOR (Mpa)*	*TP (MPa)*
T0	18,28	1282	1,27
T1	16,76	1023	1,39
T2	10,38	1403	0,90
T3	15,50	1395	1.02
T4	5,63	1084	0,32
T5	7,52	1300	0,31

MOR: Módulo de Ruptura; MOE: Módulo de Elasticidade; TP: Tração Perpendicular

Os painéis de tratamento T0 e T1 atendem o requisito da norma para painéis estruturais, o tratamento T3 encontra-se próximo ao valor mínimo exigido pela norma, de 16 MPa, e o tratamento T2 se mostra próximo ao valor requerido pela norma para painéis não estruturais.

Em relação aos valores de modulo de elasticidade, nenhum tratamento atendeu à norma. Já para os valores de tração perpendicular, os tratamentos T0, T1 e T2 atendem ao valor de norma.

Na análise de regressão, a correlação da densidade com a tração perpendicular para cada tipo de tratamento resultou em valor significativo de R-quadrado apenas para o tratamento T2, 83% de correlação. A tabela 4 apresenta os valores de correlação para cada tratamento.

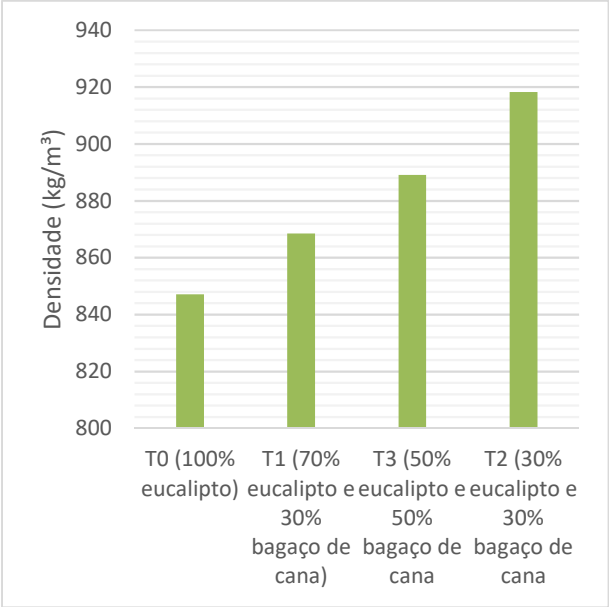
Com base nos resultados obtidos, pode-se observar a relação entre a quantidade de bagaço de cana adicionado ao resíduo de eucalipto e a sua influência nos resultados de ensaios físicos e mecânicos. Para os resultados de densidade mostrados na figura 1, nota-se que quanto maior a quantidade do resíduo bagaço de cana incorporado na massa de resíduo de eucalipto, maior a densidade do painel.

Quanto à resistência à tração perpendicular, a incorporação do bagaço de cana até 30% em massa tende a aumentar a resistência à tração perpendicular. Mas, acima de 30%, o resíduo de bagaço de cana tende a reduzir esta resistência, como observado na figura 2.

Tabela 4 – Correlações dos tratamentos entre tração perpendicular e densidade

	Resíduo de Eucalipto (%)	*Resíduo de Bagaço de cana (%)*	*Correlação entre Tração perpendicular e Densidade (%)*
T0	100	0	29
T1	70	30	52
T2	30	70	83
T3	50	50	55
T4	70	30	50
T5	50	50	30

Figura 1 – Resultados de densidade em relação à quantidade de resíduos de eucalipto e bagaço de cana utilizados



A incorporação das partículas do resíduo de bagaço de cana associada às partículas do resíduo de eucalipto se mostrou benéfico para o painel em relação à sua resistência à flexão conforme visto na figura 3, quanto esta associação não ultrapassa um valor maior que 30% em relação às partículas de resíduo de eucalipto. Este resultado pode ser devido as partículas de bagaço de cana serem menos resistentes à flexão.

Figura 2 – Resultados de TP em relação à quantidade de resíduos de eucalipto e bagaço de cana utilizados

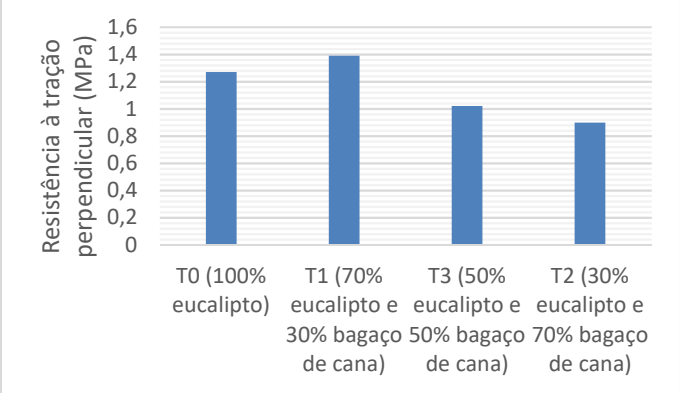
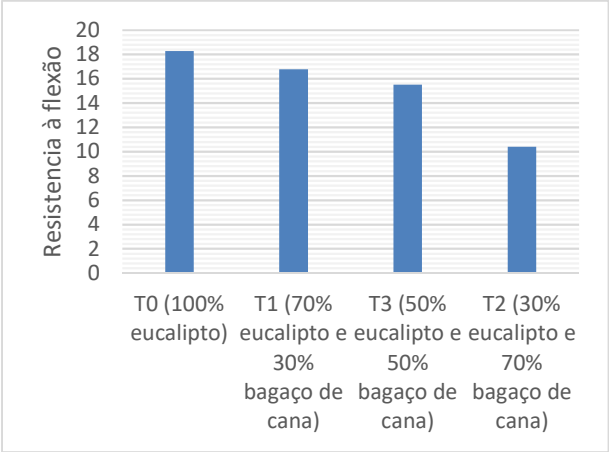
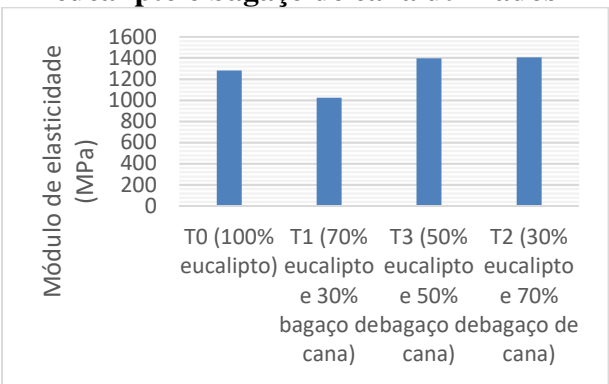


Figura 3 – Resultados de MOR em relação à quantidade de resíduos de eucalipto e bagaço de cana utilizados



Já em relação ao módulo de elasticidade, observada na figura 4, a associação das partículas de bagaço de cana às partículas de resíduo de eucalipto se mostrou benéfica de uma maneira crescente, ou seja, quanto maior a proporção de partículas de bagaço de cana em massa, maior o módulo de elasticidade obtido, este fator se dá pelo comportamento das fibras de bagaço de cana no painel, que são mais longas e flexíveis do que as partículas de madeira.

Figura 4 – Resultados de MOE em relação à quantidade de resíduos de eucalipto e bagaço de cana utilizados



Quanto à diferença entre proporções utilizadas de poliol e pré-polimero, é possível concluir que a proporção mais eficiente para os painéis é a de 1:1 quando utilizamos resina poli-uretana a base de óleo de mamona, esta proporção propiciou maior força de adesão entre as partículas e consequentemente melhor densificação do painel, gerando melhores resultados finais para as propriedades físicas e mecânicas estudadas.

4 Conclusões

De uma maneira geral, o tratamento T3 se mostrou mais eficiente para produção de painéis estruturais, necessitando ajustes no módulo de elasticidade do mesmo. Conclui-se que o

aproveitamento dos dois resíduos industriais é benéfico economicamente para o desenvolvimento regional, podendo trazer fabricas de painéis para junto das indústrias de papel e celulose e sucroalcooleiras já presentes na região, bem como melhorias ao meio ambiente, reduzindo as quantidades de resíduos descartados na natureza e incinerados para geração de energia.

5 Referências

Cohen, Y. (1996) Volatile organic compounds in the environment: a multimedia perspective.. ASTM STP 1261, Eds., American Society for Testing and Materials, pp.7-32.

Dias, F. M. (2005) Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada. Faculdade de Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo.São Carlos.

Dias, F. M.; Lahr, F. A. R. (2004) Alternative castor oilbased polyurethane adhesive used in the production of plywood. Materials Research, Vol.7, n.3, p.413-420.

Hellmeister, J. C. (1983). Madeiras e suas características, Encontro Brasileiro em madeira e em estruturas de madeira, São Carlos, Brasil.

Iwakiri, S. (2005) Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná- FUPEF, p.123-166.

Mattos, R. L. G.; Gonçalves, Mendes, R.; Chagas, F.B. das. (2008) Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. Rio de Janeiro: BNDES Setorial. 156 p.

NBR 14810-2 (2013). Painéis de partículas de média densidade: parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro.

Authors Profiles:

Larissa Queiroz Minillo recebeu o título de Mestre pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, em 2017. Atualmente é professora na Universidade do Oeste Paulista (São Paulo) onde atua também como pesquisadora. Seus temas de pesquisa são estruturas, estruturas de madeira e painéis de madeira aglomerada.

Bruna Bessa Rocha recebeu o título de Mestre pela Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho (São Paulo) em 2016. Atualmente é professora e pesquisadora na Universidade do Oeste Paulista (São Paulo) onde atua também como pesquisadora. Seus temas de pesquisa são ambiente construído, painéis de madeira aglomerada, e sistemas construtivos.

Sergio Augusto Mello da Silva é Doutor pela Universidade Estadual de Campinas em 2003. É Livre Docente pela Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho (São Paulo) onde atua também como pesquisador. Seus temas de pesquisa são ambiente construído, desenvolvimento de produtos, painéis de madeira aglomerada, MDF e sistemas construtivos.

Indústria da construção e mercado imobiliário: Uma oportunidade de financiamento dos objetivos de descarbonização para 2050

João Flores
mjflores@sapo.pt
Universidade Nova de Lisboa, UNIDEMI

Júlia Seixas
mjs@fct.unl.pt
Universidade Nova de Lisboa, CENSE

Miguel Cavique
cavique.santos@marinha.pt
Escola Naval, CINAV e UNIDEMI

Resumo:
A Diretiva Europeia de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD, Diretiva 2010/31/EU) pretende reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) associadas ao uso de edifícios na União Europeia. No entanto, os resultados esperados da implementação da EPBD limitar-se-ão a uma redução de 40% das emissões de GEE até 2050 relativamente aos níveis de 1990. Este objetivo está longe da desejada redução de mais de 80%, tal como definido no roteiro energético da UE para 2050. A EPBD exige que os edifícios tenham necessidades energéticas mínimas que devem ser abrangidas por fontes renováveis. Esta exigência deve ser definida num nível ótimo de rentabilidade, i.e., o desempenho energético que leva ao custo mais baixo durante o ciclo de vida económico estimado. Dado que o valor dos edifícios está sujeito a pressões especulativas, a discussão apresentada no presente artigo recai sobre a capacidade do mercado transferir valor para obter uma maior redução do consumo de energia do que apenas o permitido pelo modelo de custo-eficácia previsto pela EPBD. Uma avaliação do comportamento do mercado português é apresentada para verificar da possibilidade de utilização dos valores induzidos pela especulação imobiliária para atingir metas mais ambiciosas de poupança de energia nos edifícios.

Palavras-chave: Edifícios, Energia, Financiamento, Mercado Imobiliário.

Abstract:
The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD, Directive 2010/31/EU) intend to reduce the energy use and the associated greenhouse gas emissions due to buildings in the European Union. The expected results of the EPBD implementation across EU Member States will be likely limited to a 40% reduction of Greenhouse Gases emissions by 2050 below the 1990 levels. This target is far from the desired 80% reduction, as defined by the EU energy roadmap for 2050. The EPBD directive requires buildings must have minimal energy requirements which should be

covered by energy from renewable sources. The minimal energy requirement must be set at cost-optimal levels. As the price of a building is subject to various cost pressures that induce speculation the discussion introduced is to know if the market can transfer those funds to energy efficient technology in buildings. It discusses also if it is possible to attain further energy reduction than just the allowed through the cost effectiveness model predicted by the EPBD. An evaluation of the recent behaviour of the Portuguese market is presented to check if it would have been possible to use the speculation values to more ambitious energy saving targets in buildings.

Keywords: Buildings, Energy, Funding, Real-Estate Market

---

1 Introdução

O conceito de "nível ótimo de rentabilidade" proposto pela EPBD reflete a melhor solução económica face ao uso de energia em edifícios, forçando uma definição regulatória da construção de edifícios nos Estados Membros da EU que promova implicitamente o menor custo de ciclo de vida (CCV) por oposição ao menor custo inicial (CI) [1].

A EPBD, ao limitar ao menor custo de ciclo de vida na construção de edifícios, coloca uma ênfase implícita na indisponibilidade de recursos adicionais para a descarbonização de edifícios. No entanto a UE reconhece que a implementação da EPBD conduzirá, para 2050, a uma redução de 40% das emissões dos níveis de 1990, longe dos desejados 80%, que são o objetivo do Roteiro Energético da UE para 2050 [2].

O nível ótimo de rentabilidade do investimento não leva em conta o custo total do edifício, valor este que depende do preço do solo que ocupa. No entanto, o valor do edifício é fortemente dependente do custo do solo e este da sua localização, estando sujeito a pressões de custo para além das relativas às qualidades do próprio edifício.

No presente artigo, vamos apresentar como a especulação sobre o mercado imobiliário pode ter um efeito maior sobre o custo dos edifícios do que o custo previsível necessário para alcançar um nível de Energia Zero ou quase zero. A título de exemplo, este estudo utiliza dados da evolução do mercado imobiliário em algumas Freguesias do Concelho de Lisboa.

O desenho geral da EPBD será comparado com o quadro teórico económico do "problema de agência" para avaliar se a diretiva pode ser classificada apenas como uma solução para uma falha de mercado bem conhecida [6] ou um real promotor de eficiência energética e uma efectiva ferramenta de redução de gases de efeito estufa.

Para além disso, apresenta-se a bondade da transferência de valor do mercado imobiliário para o aumento da eficiência energética dos edifícios, podendo o investimento em eficiência energética dos edifícios ser uma ferramenta de ajuda à redução da emergência de crises financeiras e económicas induzidas pela especulação fundiária [3,4,5].

2 EPBD: Um verdadeiro compromisso para a redução de GEE… ou apenas uma correção de uma "falha de mercado"?

Mais do que o reconhecido [2] desfasamento entre a redução esperada de 40% e a meta do Roteiro Energético Europeu de 80% a 90% de redução das emissões em relação aos estimados para 1990, o foco explícito em usos de energia que não dependem dos utilizadores levanta o véu sobre a real natureza da EPBD.

Dado que a EPBD afirma que os Estados-Membros devem tomar as medidas necessárias para garantir que os requisitos mínimos de desempenho energético dos edifícios sejam fixados com vista à otimização de uma relação custo-benefício [1] e a metodologia proposta [1-Anexo III] que é apenas uma otimização dos custos do ciclo de vida, não constitui claramente uma medida importante e necessária para reduzir a dependência energética da União e as emissões de gases com efeito de estufa [1], como se afirma no preâmbulo da diretiva.

O custo do ciclo de vida versus o custo inicial em edifícios é apenas uma falha de mercado bem conhecida, referida como (...) o problema de agência (mandante-mandatário) na literatura económica (...) e ocorre quando um agente tem autoridade para agir em nome de um consumidor, mas não reflecte integralmente os interesses do consumidor [6].

Exemplos dessa falha são numerosos. Arquitetos, engenheiros e construtores, que geralmente procuram minimizar os custos iniciais, selecionam as tecnologias de energia que proprietários e utilizadores de edifícios utilizam. O envolvimento de intermediários na compra de tecnologias energéticas limita o papel do consumidor final na tomada de decisões e conduz a uma menorização da valorização dos custos do ciclo de vida do edifício face à minimização dos custos iniciais [6].

Outro parâmetro que compromete explicitamente o compromisso da EPBD como uma regulação ambiental robusta é o período considerado para a análise do ciclo de vida com um período de retorno de 20 a 30 anos [7]. Comparar este período de tempo com as regras sísmicas portuguesas, por exemplo [8], que decorre da regulação sísmica europeia e em que, também com uma análise do ciclo de vida, os valores recomendados para requisitos de não colapso

definem um período de retorno de 475 anos e para exigência de limitação de danos um período de retorno de 95 anos, revela a dimensão do compromisso ambiental da EPBD para a redução de emissões GEE, ou a falta dele. Comparar o compromisso implícito da EPBD com a regulamentação sísmica portuguesa assume um significado maior quando observamos que um período de retorno de 475 anos representa uma probabilidade de ocorrência de 10% de um colapso de um edifício em 50 anos. Este valor pode (e deve ser) comparado com a probabilidade de ocorrência de fenómenos indesejáveis decorrentes das alterações climáticas em 50 anos devido às emissões de GEE.

2.1 Falhas de mercado e barreiras de mercado para a eficiência energética nos edifícios

Uma regulamentação da construção mais ambiciosa com imposição de alta eficiência energética em edifícios e produção local de energia renovável poderiam também ser uma forma de superar várias outras falhas de mercado que competem contra a possível redução de emissões de carbono [6]:

- Incentivos deslocados, como a relação senhorio-arrendatário, (...) quando o senhorio compra o equipamento que usa energia mas é o inquilino que paga as contas de energia [6].
- Políticas fiscais distorcidas, Altamente relevantes para edifícios não residenciais, permitido pelo tratamento fiscal diferenciado dos custos de capital versus os custos operacionais, uma vez que os primeiros são depreciados em grandes períodos (30 anos ou mais) enquanto os custos operacionais são totalmente dedutíveis do lucro tributável [6].

Ao mesmo tempo, a imposição legal de sistemas de alta eficiência nos edifícios, desde a sua criação, reduziria a barreira do mercado financeiro ao uso de equipamentos de alta eficiência, dado que o custo de capital para o investimento num edifício que incorpora tecnologias de alta eficiência é necessariamente menor do que o custo de capital para a adaptação de um edifício com exactamente as mesmas tecnologias após a construção do edifício.

2.2 Regulamentação da construção focada no ambiente

É improvável que um nível óptimo de rentabilidade do ciclo de vida seja um fardo para os proprietários. A redução dos custos de energia deverá pagar exactamente a diferença no custo

de construção. De facto, se as condições do nível óptimo de custos estabelecidas pelos regulamentos [7] corresponderem exactamente à evolução futura dos custos energéticos e da inflação estimada, a poupança de energia num nível óptimo de custo do ciclo de vida resultará em menores necessidades de fluxos de caixa para a energia dos edifícios que compensam o maior fluxo de caixa necessário para pagar o edifício de alta eficiência. No final, o custo global de utilização do edifício (custos de aquisição e de consumo de energia) deverá permanecer o mesmo.

Sabemos também que outras regulamentações obrigatórias existentes, como as regulamentações sísmicas acima mencionadas, são amplamente aceites, mas embora inicialmente resultem em custos de construção iniciais mais elevados, não geram previsivelmente qualquer redução no fluxo de caixa devido ao uso do edifício.

No que se refere aos objectivos políticos da União Europeia para 2050, é razoável aceitar que se impõem reduções mais ambiciosas do que apenas as de nível óptimo de rentabilidade nos regulamentos das emissões de gases com efeito de estufa dos edifícios. Para atingir objectivos de descarbonização mais ambiciosos é necessário levar a sério um maior esforço para financiar as melhorias necessárias a uma maior eficiência energética dos edifícios.

Como a EPBD promove o uso de tecnologias existentes de eficiência energética que se devem pagar por si mesmas, e se essas tecnologias não são suficientes para atingir as metas de descarbonização de 2050 será necessário encontrar outras formas de financiar uma maior redução das necessidades de energia dos edifícios e da produção de energia renovável in situ.

Devemos ainda lembrar que qualquer modelo de código de construção de eficiência energética que se baseie em princípios de custo eficiente exigirá um conhecimento prévio do investimento e da quantidade de consumo de energia.

A análise da rentabilidade ou do custo do ciclo de vida exige o conhecimento exacto da quantidade de serviços energéticos a utilizar/consumir durante o período de análise. Este requisito da abordagem de custo-eficiência torna a EPBD inadequada na avaliação dos serviços de energia relacionados com os utilizadores que exigem o conhecimento antecipado de quantidades (necessariamente indeterminadas) de consumo de energia dado serem dependentes do comportamento dos usuários.

Este facto é, por si só, mais uma prova das deficiências do modelo que sustenta a EPBD, tendo autores já abordado este problema [9], que está fora do escopo do presente artigo.

3 Disponibilidade de financiamento para uma maior eficiência energética nos edifícios

3.1 Comportamento dos mercados imobiliários e ciclos económicos

Devido à sua natureza intrínseca, os mercados imobiliários não podem ser comparados a outros mercados de produtos transaccionáveis, já que o mercado dos solos disponíveis para construção tem um suprimento fixo de terrenos [3] sendo completamente inelástico no lado da oferta, e com um preço muito sensível às mudanças na procura, ao contrário de outros activos para os quais a quantidade também pode mudar com o preço [3].

Além disso, os solos podem permanecer sobrevalorizados durante vários anos dado que não geram a produção de mais solo. [4] Igualmente, quando os preços do mercado imobiliário se encontram em crescimento, as extrapolações da tendência ascendente do preço podem gerar expectativas imprecisas que, por sua vez, podem confundir o comportamento dos investidores resultando em bolhas especulativas [5].

A especulação imobiliária pode ter graves consequências nos ciclos económicos, gerando por si só crises económicas. Uma característica marcante das crises financeiras associadas às recessões do ciclo económico é que as economias mais seriamente afectadas experimentam primeiro um colapso dos preços dos imóveis e um consequente enfraquecimento dos sistemas bancários antes de passarem por uma crise cambial, uma crise financeira e uma crise económica [5].

O impacto das bolhas especulativas nos ciclos económicos segue um padrão identificável levando ao colapso do ciclo económico que se pode manter muito tempo, mesmo décadas, após o início da crise económica [4].

O padrão consiste num ciclo de subida dos preços dos solos, sobre-investimento em capital fundiário e a compra generalizada de terras economicamente marginais, seguida por uma rápida reversão dos preços dos terrenos, e a inadimplência de empréstimos em activos que não produzem fluxos de caixa positivos [4].

Vários modelos previstos para reduzir ou eliminar o problema da especulação fundiária e suas consequências foram apresentados [3, 4, 5], prevendo genericamente um ambiente regulatório baseado em impostos sobre os solos. No entanto, é importante lembrar que a tributação de bens em mercados inelásticos apresenta o risco dos impostos serem, pura e simplesmente, repassados aos compradores.

3.2 Disponibilidade de financiamento para aumento do desempenho energético dos edifícios

A utilização de edifícios com maior eficiência energética, apenas nos níveis prescritos de custo-eficácia da EPBD conduzirá inevitavelmente a um custo inicial mais elevado do edifício do que o custo inicial mais baixo, não só para a construção de novos edifícios, mas também para a remodelação de edifícios existentes.

Mas o custo final de um edifício nunca é limitado à sua construção, e o custo associado com do solo onde o edifício é erguido é menos uma função dos atributos do edifício do que as variáveis associadas ao terreno onde o edifício é edificado.

A localização do edifício é uma das variáveis mais relevantes na avaliação do mercado imobiliário de um edifício, e é uma variável que está quase totalmente relacionada com o custo dos solos. Com uma actualização contínua dos regulamentos de construção e com a natural evolução dos materiais e acessórios de construção disponíveis, o conjunto dos atributos dos novos edifícios irá inevitavelmente aumentar com o passar dos anos.

É razoável supor que em apenas uma ou duas décadas, o valor real (e o valor percebido pelo mercado) da qualidade dos edifícios mais recentes irá aumentar visivelmente face aos mais antigos. Por outro lado é aceitável assumir que o valor de mercado do parque imobiliário construído, se bem mantido, deveria reter suas qualidades e valor originais.

Assim, os valores das transacções reais de edifícios existentes dentro do parque imobiliário construído podem ser usados como uma boa aproximação para a evolução dos preços dos terrenos. Como um edifício, com o tempo, irá inevitavelmente manter ou reduzir seus atributos quando comparado com um edifício novo, o aumento do seu preço só pode ser associado à valorização do solo na vizinhança da sua localização.

Se, para uma vizinhança definida e consolidada, uma parte razoável do parque imobiliário permanecer inutilizada e, portanto, o aumento de preços não puder ser atribuído à falta de oferta, estaremos numa situação de fronteira de especulação fundiária, resultando na utilização de fundos em activos que não criam fluxos de caixa positivos e promovendo condições para a emergência de crises financeiras e económicas.

Dirigir o financiamento disponível à descarbonização dos edifícios pode ser uma forma de dissuadir simultaneamente a especulação sobre os solos e atingir os desejados objectivos de descarbonização da União Europeia 2050.

A imposição de padrões mais elevados de nZEB, de acordo com os níveis de financiamento disponíveis demonstrados pela evolução do mercado, teria a vantagem adicional de mitigar as

condições para a ocorrência de crises financeiras e económicas sem cair na armadilha de atacar a especulação fundiária por via de impostos.

4 Custo dos terrenos e custo de construção dos edifícios

Qualquer melhoria das regulamentações sobre emissões de GEE resultantes da utilização de edifícios terá impacto sobre o primeiro custo de edifícios, mas como o custo global de um edifício deve incluir o custo do terreno, é necessário saber quanto do custo de um edifício é dependente do custo do terreno e quanto depende da construção do próprio edifício.

Em Portugal é possível usar como um minorante para o custo de um edifício residencial o valor máximo aceite para a construção de habitação social [10,11]. Para um edifício residencial social em Lisboa, o valor resultante (valor de base no quadro 1) deve ser multiplicado por 1,14 para corrigir a área bruta para a área líquida e por um factor de 1,62 para o ano de 2016 devido à localização, outros custos e lucros resultantes da construção do edifício [10, 11] obtendo-se um valor de 1,114 €/m^2. Devido aos regulamentos de construção rigorosos existentes, a construção de habitação social só difere de imóveis de mercado nos acabamentos, alguns complementos e limites de área por hábitação, visto a habitação social ter um limite máximo de áreas definido regulamentarmente [11].

Tabela 1. Valor médio da construção por metro quadrado, fixado anualmente (por Portaria), sob proposta da Comissão Nacional de Avaliação de Edifícios Urbanos (CNAPU), após a audição das entidades definidas na lei portuguesa.

Ano	Valor médio "a" (de construção por m2)	Valor base (="a"+25%)	Diploma Legal (Portaria)
2016	482,40 €	603,00 €	419/2015, de 31.Dez.15
2015	482,40 €	603,00 €	280/2014, de 29.Dez.14
2014	482,40 €	603,00 €	370/2013, de 27.Dez.13
2013	482,40 €	603,00 €	424/2012, de 28.Dez.12
2012	482,40 €	603,00 €	307/2011, de 21.Dez.11
2011	482,40 €	603,00 €	1330/2010, de 31.Dez.10
2010	482,40 €	603,00 €	1456/2009, de 30.Dez.09
2009	487,20 €	609,00 €	1545/2008, de 31.Dez.08

(Fonte, Diário da República, vários, de 2009 a 2015)

Todos os outros sistemas relevantes (comportamento estrutural, sísmico, térmico, rede eléctrica e iluminação, rede de comunicações, sistemas de água e esgoto), bem como áreas mínimas por divisão nos fogos, são estritamente reguladas e comuns tanto para habitação social

como de mercado e podem ser assumidos como um padrão da indústria de construção. Se compararmos o custo de um edifício, com o valor deste no mercado imobiliário, podemos ter uma visão aproximada da diferença entre os limites reais de investimento aceites em edifícios e o custo de edificar um novo edifício.

Essa diferença pode mostrar a ordem de grandeza do financiamento disponível para investimentos em redução de emissões de GEE através da melhoria das tecnologias dos sistemas de energia dos edifícios e na produção de energia renovável no local.

4.1 Evolução dos preços dos imóveis em Freguesias selecionadas de Lisboa

A menor divisão administrativa em Portugal é a Freguesia, possuindo Lisboa 24 desde 2013 [12] como resultados da fusão das 54 anteriores que existiram formalmente de 1852 até 2012. Destas Freguesias foram escolhidas quatro (Alvalade, Areeiro, Avenidas Novas e Benfica), com um parque edificado consolidado e valores desprezáveis de construção nova desde 2012, e que apresentam a maioria dos seus edifícios para uso residencial. Estas Freguesias foram selecionadas para analisar o valor de mercado dos edifícios e sua evolução desde o início da nova organização administrativa (2013 a Agosto de 2016).

Os edifícios dessas Freguesias são na sua maioria [13] pré-1980 e, consequentemente, não cumprem com os regulamentos sísmicos, térmicos e elétricos atualmente em vigor. Em cada Freguesia verifica-se uma elevada homogeneidade dos edifícios em termos de dimensões, número de fogos por edifício e idade dos edifícios.

Tabela 2. Custo médio por m^2 das transacções de construção e número de transacções em Freguesias de Lisboa seleccionadas de 2013 a Agosto de 2016

Freguesia		2013	2014	2015	2016 (até Ago.)
Alvalade	Valor/m^2	1.565 €	1.712 €	2.072 €	2.284 €
	nº de transacções	49	111	168	101
Areeiro	Valor/m^2	1.733 €	1.935 €	1.919 €	2.213 €
	nº de transacções	69	76	114	69
Avenidas Novas	Valor/m^2	1.861 €	2.128 €	2.270 €	2.573 €
	nº de transacções	134	149	176	131
Benfica	Valor/m^2	1.442 €	1.484 €	1.527 €	1.773 €
	nº de transacções	93	108	116	110
Média	(Valor/m^2)	1.650 €	1.815 €	1.947 €	2.211 €
Total	nº de transacções	345	444	574	411

O valor das transacções reais relativas aos anos de 2013 a Agosto de 2016 nas Freguesias seleccionadas e a área de cada fogo vendido permitiu a determinação da evolução do custo médio por m^2 do parque imobiliário.

Embora o custo de construção em Portugal se tenha mantido estável desde 2010 (Tabela 1), com um crescimento do PIB quase nulo e um ambiente de inflação negligenciável (Tabela 3), o custo médio por m^2 dos edifícios transaccionados nas Freguesias seleccionadas aumentou em menos de quatro anos entre 23% e 45%, mesmo com um elevado potencial de oferta, dado pela percentagem de fogos desocupados (11,7% para Alvalade, 16% para Areeiro, 19% para Avenidas Novas e 11% para o Benfica Freguesias [13]),

Num ambiente de inflação e crescimento do PIB próximos do zero, verifica-se uma elevada disponibilidade de recursos para investimento em imóveis de construção tecnicamente desactualizada localizados em áreas urbanas residenciais consolidadas.

Tabela 3. Valores de evolução cumulativa do custo médio de transacção por m^2; Custo de por m^2 de fracções transaccionadas em Freguesias de Lisboa, PIB e inflação, de 2013 a Agosto de 2016.

Freguesia	2013	2014	2015	2016 (até Agosto)
Alvalade	100%	109%	132%	146%
Areeiro	100%	112%	111%	128%
Avenidas Novas	100%	114%	122%	138%
Benfica	100%	103%	106%	123%
Custo de Construção	100%	100%	100%	100%
PIB	100%	99%	100%	101%
Inflação	100%	103%	103%	104%

Este facto é uma evidência absoluta da diferença entre a indústria da construção e o mercado imobiliário, valorizando este último outros parâmetros que não os de uso eficiente de energia nos edifícios, entre outros.

Existindo uma clara evidência de abundância de recursos para aplicar em activos reais que não apresentam valor acrescentado de natureza técnica, é evidente que estes poderiam ser canalizados para a promoção de padrões de eficiência mais elevados em edifícios.

Mais do que apenas uma prova da disponibilidade de recursos para aplicar em imóveis, os elevados aumentos do valor dos imóveis no mercado imobiliário podem ser um sintoma de alocação irracional de recursos, que deve ser corrigido através de políticas públicas.

4.2 Avaliação da ordem de grandeza do investimento em medidas de redução de energia em edifícios

Existem agora vários exemplos [14] de trabalho sobre a identificação de soluções nZEB ótimas em termos de custos e até mesmo vários exemplos de nZEB já construídos.

A diferença entre um edifício com o menor custo de ciclo de vida (LLCC) e um com o custo inicial mais baixo (LIC) pode ser em Portugal tão baixo como 7% dos custos relacionados com a energia (considerando apenas os custos de construção e dos equipamentos que têm impacto nos serviços de energia) [14].

Como os custos que se relacionam com energia representam menos de 28% do custo do edifício [14,15], verificamos que a magnitude da aplicação da EPBD situa-se em valores entre 2% a 6% dos custos de construção, diferença quase desprezável quando confrontada com o enorme aumento dos preços dos imóveis observados (Tabela 3).

O requisito de nível ótimo de custo do ciclo de vida da EPBD é calculado com um intervalo definido para o tempo da análise de investimentos em eficiência energética dos edifícios com um fator de desconto também definido [7].

Com uma regulamentação baseada no ajustamento apenas destas duas variáveis à evolução dos preços imobiliários a nível local, aumentando o tempo de análise e reduzindo o fator de desconto médio em função do aumento dos preços do imobiliário nas Freguesias é possível prosseguir de forma sólida e sustentável objetivos de descarbonização mais elevados para as construções previstas na diretiva.

Como a oportunidade de atualizar o parque imobiliário apenas através da construção e renovações afetadas pela EPBD levará várias décadas, e terá um impacto menor em áreas consolidadas, outros caminhos deverão ser explorados de forma a atingir os objetivos de descarbonização desejados.

Uma forma é atuar igualmente sobre as transações de edifícios do parque construído. A atuação sobre todos os edifícios do parque construído permite uma mais rápida renovação dos edifícios em termos de eficiência energética, do que a atuação apenas sobre as novas construções e as renovações.

Em Portugal a certificação de desempenho energético é obrigatória quando se vende ou se aluga uma habitação. Quando um Certificado de Desempenho Energético (EPC) é emitido, apresenta não apenas a banda de eficiência atual da fração objeto do certificado mas também

um relatório de possíveis melhorias, respetivo custo e efeito esperado caso as melhorias indicadas sejam executadas.

O custo indicativo das medidas recomendadas, juntamente com a valorização das poupanças, dá um valor imediato dos custos necessários para melhorar a eficiência do edifício e da nova banda de maior eficiência alcançável. O custo das medidas recomendadas pode ser comparado diretamente com o aumento da valorização do edifício por via dos movimentos especulativos na respetiva Freguesia. Nas Freguesias onde os preços dos bens imobiliários exibam aumentos que ultrapassem o custo indicativo das medidas recomendadas, estas deverão tornar-se obrigatórias antes de qualquer transação.

5 Discussão

A EPBD falha como regulação ambiental, por recorrer a um modelo que apenas permite a análise e intervenção no consumo de energia relativa aos serviços de energia com consumos quantificados conhecidos, e com um racional que limita a descarbonização da utilização dos edifícios na medida da estrita eficiência económica das medidas ambientais implementadas. Os valores de especulação fundiária representam a disponibilidade de recursos para investir em imóveis podem ser medidos e comparados com o custo de intervenções para atingir a redução do consumo de energia em edifícios.

Os valores de transações na Freguesias selecionadas de Lisboa mostram-nos que a especulação pode facilmente absorver recursos uma ordem de grandeza acima dos necessários para promover os investimentos na redução de energia dos serviços de energia de uso de edifícios.

Como os modelos previstos para reduzir ou eliminar o problema da especulação fundiária e as suas consequências [3, 4, 5] preveem um ambiente regulador centrado nos impostos sobre o valor dos terrenos, mais que racional é mesmo desejável recorrer a um esquema obrigatório de investimento em eficiência energética como mecanismo para mitigar a especulação nos mercados imobiliários.

Como a tributação de bens em mercados inelásticos apresenta o risco de os impostos sobre o valor dos terrenos serem simplesmente repassados aos compradores, os investimentos em eficiência energética em edifícios constituem medidas de poupança que apresentam um retorno económico positivo.

Ao impor ao nível da Freguesia (ou qualquer outra divisão geográfica) uma avaliação periódica do valor das transações imobiliárias, é possível detetar precocemente o comportamento especulativo dos mercados e agir em conformidade, impondo níveis mais elevados de investimento em eficiência energética dos edifícios, obtendo vantagens ambientais na redução das emissões de gases com efeito de estufa e dos fluxos positivos de tesouraria gerados pelas poupanças de energia.

Estas medidas poderiam ser implementadas no âmbito da EPBD através do aumento do intervalo de tempo da análise do nível ótimo de rentabilidade e reduzindo simultaneamente o fator de desconto daquela análise, quando um aumento dos preços de imóveis devido à especulação for detetado.

Como o quantitativo de edifícios novos e edifícios renovados representam um número menor de oportunidades de melhoria do desempenho energético do parque construído do que o número total de transações deverão todos os edifícios transacionados ser alvo de ações de melhoria de eficiência energética.

Para cada edifício, ou fração, transacionados em Freguesias com níveis identificados de valores de especulação acima dos custos das medidas de melhoria listadas no relatório de recomendações do Certificado de Desempenho Energético (EPC) do edifício, estas recomendações deverão tornar-se obrigatórias.

6 Investigação futura

Deve ser estabelecido um modelo público e transparente para a monitorização contínuo dos preços imobiliários, com definições claras de limites geográficos. Uma relação entre o aumento dos preços dos bens imobiliários, o crescimento do PIB e a inflação e o período de tempo da análise custo-benefício e o factor de desconto médio tal como definido na EPBD deverão ser definidas. Para um conjunto definido de intervalos de aumento dos preços dos imóveis, é necessário definir pares de intervalos de tempo (mais elevados) para a análise de custo-benefício e (menores) factores de desconto médios para aplicar na análise prevista na EPBD.

Como a EPBD não aborda os consumos relacionados com o utilizador, deve ser redesenhada com um suporte teórico mais abrangente ou complementada com regulamentos capazes de abordar esses consumos. Embora seja difícil conhecer os montantes dos serviços energéticos relacionados com o utilizador, os autores acreditam que já existem modelos teóricos robustos [9,16] que podem ser aplicados a esses serviços de energia em edifícios.

7 Conclusões

Não é razoável regular a construção de edifícios fora das realidades do mercado imobiliário. Devido ao comportamento do mercado dos solos onde os edifícios são erguidos, estes últimos apresentam um comportamento que não pode ser comparado com quaisquer outros bens industriais.

O modelo de nível óptimo de rentabilidade utilizado na EPBD não pode ser considerado uma política ambiental, uma vez que aborda apenas uma conhecida falha de mercado, o "problema de agência".

Com recursos evidenciados pelo rápido aumento dos valores do mercado imobiliário (como nos exemplos apresentados), é injustificável propor uma abordagem moderada ao consumo de energia nos edifícios tal como a preconizada na EPBD.

A especulação fundiária, além de desviar recursos para activos não-produtivos, tem um papel na promoção de crises financeiras e económicas que prejudicam ainda mais a capacidade de investimento em eficiência energética e na redução das emissões de GEE.

Como as soluções aceites para a mitigação e controle da especulação fundiária são geralmente baseadas em impostos sobre os terrenos, um uso produtivo do financiamento especulativo em solos deverá ser dirigido a investimentos em eficiência energética nos edifícios, investimento esse gerador de fluxos de caixa positivos e que enfrenta de uma forma positiva os problemas de emissões de GEE no uso de edifícios.

Como proposto, o financiamento necessário para alcançar níveis mais elevados de redução de emissões no uso de edifícios pode ser identificado através da monitorização do comportamento dos mercados imobiliários e da aplicação dos modelos regulamentares já previstos na EPBD na melhoria da eficiência energética dos edifícios.

Não apenas os edifícios novos e os remodelados são oportunidades para melhorar o desempenho energético do parque edificado, mas cada transacção imobiliária é igualmente uma oportunidade no caminho para reduzir o consumo de energia no uso de edifícios.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. João Gilberto Mata pelos dados detalhados das transacções imobiliárias de Janeiro de 2013 a Agosto de 2016 nas Freguesias de Lisboa.

Referências

[1] European Parliament (2010), Directive 2010/31/EU of the European Parliament, and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Directive 2010/31/EU, Brussels, EPBD.

[2] European Commission (2011), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions., {SEC(2011) 1566 final}, {SEC(2011) 1569 final}, "Energy Roadmap 2050".

[3] Foldvary, Fred E.; (1998). *Market-hampering Land Speculation: Fiscal and Monetary Origins and Remedies,* American Journal of Economics and Sociology, Vol 57, No,4, October,1998.

[4] Gaffney, Mason; (2009) *The Role of Land Markets in Economic Crises*, American Journal of Economics and Sociology, Vol. 68, No. 4, October, 2009.

[5] Malpezzi, Stephen e Wachter, Susan M., (2005). *The Role of Speculation in Real Estate Cycles* Journal of Real Estate Literature, Volume 13, number 2, 2005.

[6] Brown Marilyn A.; (2001) *Market failures and barriers as a basis for clean energy policies*, Energy Policy 29, 1197–1207, 2001.

[7] Commission Delegated Regulation (EU) Regulations No 44/2012 of 16 January 2012, supplementing Directive 2010/31/EU

[8] Norma Portuguesa NP EN-1998-1, (2009) Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos.

[9] Flores J.; Seixas, J.; Mourão A. e Cavique M.; (2016) *The need to advance the energy performance buildings directive (EPBD) towards the EU energy roadmap for 2050*; 41st IAHS World Congress, 2016

[10] Decreto-Lei n.º 385/89 de 8 de Novembro, Diário da República n.º 257/1989, Série I de 1989-11-08, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 1989.

[11] Portaria nº 500/97 de 21 de Julho, Diário da República n.º 166/1997, Série I-B de 1997-07-21, Ministério do Equipamento, do Planeamento e da Administração do Território, 1997

[12] Lei n.º 56/2012, 08 Novembro 2012, Diário da República n.º 216/2012, Série I de 2012-11-08, Assembleia da República, 2012.

[13] Instituto Nacional de Estatística, Censos 2011, Mapas Q204 e Q309

[14] Kapsalaki, M.;, Leal, V.; Santamouris, M.; (2012) *A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings*, Energy and Buildings 55 (2012) 765–778

[15] Bezelga, A.; (1984) *Edifícios de Habitação - Caracterização e Estimação Técnico-Económica*, UTL-INCM, 1984.

[16] Flores, João; Gonçalves-Coelho, António; Mourão, António; Cavique, Miguel; (2015) Theory of Practices as a Means to Uncover the Customer Needs, *Procedia CIRP, Volume 34, Pages 25–30, 9th International Conference on Axiomatic Design (ICAD 2015)* Florence, Italy, 2015.

Authors Profiles

João Flores is a PhD student at the Faculty of Science and Technology of NOVA University of Lisbon (FCT NOVA). A former Director of several energy distribution and energy services equipment companies, is a Consultant with extensive work in due diligence for M&A operations, strategy and operational design for energy distribution contractors and public funding for energy efficiency projects. His research interests are in the areas of near-zero energy buildings and sustainability.

Júlia Seixas is a Professor at the Faculty of Science and Technology of NOVA University of Lisbon (FCT NOVA). She coordinates the Energy & Climate line, at the Center for Environmental and Sustainability research (CENSE) at FCT NOVA, dedicated to the research of carbon neutral energy futures, and its linkages with climate change. Her research interests are in the areas of energy system analysis, nexus energy and water and food, and climate innovation at local and hiper-local scales.

Miguel Cavique is Professor at the Naval Academy in Naval Engineering field of Mechanics. He worked at the gas network of Lisbon, and gave consultancy on air conditioning design and energy auditing of buildings. His research activity has been on Axiomatic Design (AD), in particular on the application to energy systems and to the marine industry.

Casa Ecológica PUCP: 25 años como Parque de Innovación en Energías Renovables en el Perú

Miguel Hadzich Marín
mhadzic@pucp.edu.pe
Pontificia Universidad Católica del Perú

Sandra Vergara
Sandra.vergara@pucp.pe
Pontificia Universidad Católica del Perú

Resumen:
En el año 1992 se forma el Grupo de Apoyo al Sector Rural en la Pontificia Universidad Católica del Perú, integrado inicialmente por ingenieros mecánicos y pone su sede en el campus universitario bajo el nombre de "Casa Ecológica PUCP". Durante estos 25 años ha venido recibiendo miles de visitantes de colegios, institutos y universidades, que lo han convertido en un Parque Científico de Innovación y Desarrollo, considerado actualmente como un museo viviente obteniendo varios premios internacionales. Se tienen en demostración permanente más de 50 tecnologías apropiadas que usan las energías renovables como hidráulica, eólica, solar y biomasa. La mayoría de equipos fueron construidos en talleres propios y fueron temas de investigación, desarrollo y validación en zonas rurales estimulando el desarrollo de los habitantes de diferentes regiones. Varias réplicas de esta Casa Ecológica se están difundiendo en zonas de costa, sierra y selva donde se muestran las tecnologías idóneas según el clima y necesidades de cada región. En este trabajo se presentan las tecnologías, historia y experiencias de este modelo de Parque Temático creado con el propósito de difundir y promocionar tecnologías apropiadas; y socializarlas para el desarrollo de capacidades del usuario usando la metodología fundamental de demostración.

Palabras clave: Casas ecológicas, Centro de innovación, Energías Renovables, Proyecto demostrativo

Abstract:
In 1992 the Support Group for the Rural Sector was formed at the Pontifical Catholic University of Peru, initially composed of mechanical engineers and has its headquarters on the university campus under the name of "PUCP Ecological House". During these 25 years it has been receiving thousands of visitors from schools, institutes and universities, which have turned it into a Scientific Park of Innovation and Development, currently considered a living museum, obtaining several international awards. More than 50 appropriate technologies are being permanently demonstrated using renewable energies such as hydro, wind, solar and biomass. Most of the technologies were built in workshops own and were subjects of research, development, and validation in rural areas, stimulating the development

of the inhabitants of different regions. Several replicas of this Ecological House are spreading in coastal areas, highlands, and jungle where the best technologies are shown according to the climate and needs of each region. This paper presents the technologies, history, and experiences of this Theme Park model created with the purpose of disseminating and promoting appropriate technologies; and socialize them for the development of user skills using the fundamental demonstration methodology.

Keywords: Demonstration project, Ecological houses, Innovation center, Renewable energies

---

1 Introducción

El Grupo de Apoyo al Sector Rural (GRUPO PUCP) es una unidad operativa del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Desde el año 1992 venimos realizando proyectos de desarrollo a favor de comunidades campesinas, relacionados con la investigación científica aplicada, transferencia e innovación tecnológica, difusión y promoción de tecnologías apropiadas y actividades de conservación del medio ambiente. Nuestro objetivo es mejorar la calidad de vida de la población rural en los ámbitos de energía, agua, agricultura y vivienda; mediante la difusión y aplicación de tecnologías apropiadas para contribuir al desarrollo sostenible del sector rural del Perú.

El GRUPO PUCP ha realizado numerosos diseños e implementaciones de equipos para su utilización en varias zonas del Perú. Estas experiencias constituyen un historial suficientemente significativo para validar los modelos metodológicos que se deduzcan de la investigación.

El proyecto denominado "Casa Ecológica PUCP" es un espacio experimental y demostrativo que pretende mostrar a las personas del sector rural y público en general de las diversas tecnologías no convencionales aplicables para la satisfacción de necesidades del sector rural, sin contaminar el ambiente.

La idea fundamental es demostrar el ciclo ecológico, haciendo que la tecnología se complemente con las necesidades para obtener una vivienda que use eficientemente los recursos de su medio, sin degradarlos y de manera sostenible.

Estas tecnologías, que emplean energías no convencionales (viento, sol, agua, biomasa), han dado lugar a equipos desarrollados en la Pontificia

Universidad Católica Perú; tales como: aerogeneradores, aerobombas, calentadores solares, sistemas fotovoltaicos, riego tecnificado, cocinas mejoradas a leña, biohuertos, casa antisísmica de adobe, etc. las cuales están a disposición de la gente del campo.

2 Objetivos

a. Difundir y promocionar las tecnologías apropiadas para el sector rural, enfocadas especialmente en las Energías Renovables de manera que el poblador pueda usar eficientemente los recursos naturales del medio que lo rodea sin degradarlos.
b. Socializar las tecnologías para el desarrollo de capacidades del usuario, el cual busca adaptarlas para cubrir una autosuficiencia energética en equilibrio con su ambiente.

Figura 1 – Dibujo de Casa Ecológica PUCP en 1992

3 Estrategias de intervención

Las estrategias de intervención que se han considerado para la difusión y promoción, se basan principalmente en la instalación de un centro experimental y demostrativo instalado en el campus universitario, lugar donde los posibles usuarios pueden ver, conocer e interactuar con las tecnologías desarrolladas; y así adoptar las apropiadas para cubrir sus necesidades.

Con este fin se han instalado equipos que se encuentran disponibles y al alcance del poblador rural, los cuales sirven para demostrar "en directo" la aplicación, operación y ventajas en los aspectos técnico y económico a todos los visitantes provenientes de diversas partes del país, los cuales diariamente acuden a la Casa Ecológica. Una vez explicado el funcionamiento y ventajas de los equipos al visitante, se les da la posibilidad de llenar una ficha de evaluación técnica indicando los recursos de su comunidad, tales como: eólico, hidráulico, biomasa y solar. Con estos datos se procede a evaluar las posibilidades, tanto técnicas como económicas, de la implementación de algunas de las tecnologías demostradas u otras que sean convenientes para las necesidades del visitante.

Personal especializado del GRUPO se encarga de la atención a los visitantes resolviéndoles las dudas e inquietudes a sus problemas.

Metodología aplicada: Tienen como metodología fundamental la demostración de todos los equipos para que el usuario identifique cuál tecnología, o la combinación de varias, pueden cubrir su necesidad. Es así que la propuesta de solución es también brindada por el propio usuario con el conocimiento previo adquirido.

4 Breve historia del GRUPO PUCP

En el año 1992 se crea oficialmente el GRUPO como institución de apoyo para la gente del sector rural y dedicado especialmente a la promoción de tecnologías apropiadas relacionadas con las energías limpias. La Casa Ecológica PUCP, su local institucional, es una casa antisísmica de adobe que cuenta con múltiples servicios de agua, luz, desagüe, etc. que utiliza algunos equipos que funcionan con energías renovables. Desde esa época se ha recibido la visita de más de 100,000 personas, entre los que destacan alumnos de colegios, institutos y universidades, así como autoridades políticas y municipales hasta personas naturales, especialmente gente del campo desde los lugares más recónditos de nuestro país.

En el año 1997 la empresa de distribución eléctrica Luz del Sur en convenio con la universidad, inauguraron la muestra educativa “MUNDO ECOLOGICO” el cual duró 5 años de exposición itinerante en los diferentes distritos de Lima, tales como: Miraflores, San Juan de Miraflores, La Molina, Surco y Lima. En cada uno de estos distritos se recibieron la visita de más de 30,000 alumnos, donde destacan los colegios nacionales de instrucción primaria de bajos ingresos económicos. Esta muestra incluye entre sus exposiciones prototipos de energías renovables de fácil aplicación: aerobombas, aerogeneradores, bombas de soga, bombas de ariete, etc. que son manipulados por los propios alumnos.

En 1999, la Universidad Católica introduce el curso taller: “Mañana Científica Ecológica” para los alumnos de 5 y 6 grado de primaria (niños entre los 9 y 11 años) que reciben 3 cursos de 2 horas cada uno en temas de energías renovables que están incluidos en el currículo de educación primaria del Ministerio de Educación del Perú, estas incluyen: Energía solar (fotovoltaica y térmica); energía hidráulica (bombeo y generación de electricidad) y energía eólica (aerobombas y aerogeneradores). La enseñanza fue gratuita durante los primeros 10 años y actualmente se cobra 5 US$ por alumno; los niños se llevan a sus casas los productos realizados en estos talleres, tales como: papel reciclado, plantas del biohuerto, juguetes solares y eólicos, etc. Muchos de estos colegios han incluido este taller en su programación anual de los cursos de Ciencia, Tecnología y Ambiente correspondientes a la malla curricular peruana.

En el año 2000 y sucesivos, con el apoyo del rectorado de la universidad, se complementa la Casa Ecológica PUCP con nuevas máquinas de energías renovables para reforzar los equipos ya existentes, entre ellas se adicionan: Bomba de soga, aerobomba gaviotas, aerogenerador económico con imanes permanentes, picoturbina de 20W, microturbina de 250W y 2,5kW, bombas de ariete de diversos tipos (inglesa, japonesa, de plástico, etc.) y bombas solares.

Figura 2 – Casa Ecológica PUCP en 1992

Figura 3 – Muestra itinerante Mundo Ecológico

A la fecha el GRUPO está tratando de adaptarse y difundir el concepto de Permacultura para su integración al modelo sostenible de la Casa Ecológica PUCP incluyendo modelos agronómicos y arquitectónicos, tales como los biohuertos hidropónicos, riego tecnificado, casas antisísmicas de bajo costo, arquitectura bioclimática, crianza de animales menores, etc.

Los proyectos realizados por el GRUPO PUCP se centran en aquellas tecnologías que se orientan a satisfacer las necesidades básicas de una población rural tales como energía térmica, eléctrica y mecánica para el bombeo de agua, electrificación, confort térmico y procesos agroindustriales.

Actualmente, los alcances del GRUPO PUCP se refieren a la transferencia tecnológica para los medios rurales en el Perú donde las condiciones sociales y económicas de la población son limitadas, lugares donde necesitan tecnología para poder desarrollarse pero que, por razones

varias (pobreza, ubicación educación, cultura, tradiciones, etc.) es muy difícil introducir cualquier tecnología y, más aún, hacerla de forma tal que llegue a ser una tecnología sostenible para ellos.

5 Casa Ecológica PUCP

La Casa Ecológica PUCP, ubicada dentro del campus universitario en Lima, es una unidad de vivienda y producción. Unos de los problemas de las poblaciones rurales, es la de establecer en base a sus recursos disponibles la forma adecuada de diseñar y construir sus viviendas. Si bien a lo largo de nuestro país los diseños se hacen evidentes dependiendo de las zonas - a dos aguas en sierra y selva, por ejemplo, se hace necesario aplicar conceptos arquitectónicos (distribución y luminosidad), bases de ingeniería (infraestructura resistente), etc.

5.1 Casa antisísmica de adobe

Esta edificación es una unidad de adobe, de un piso, con un ambiente de reunión familiar, servicio higiénico, cocina y dos dormitorios, en 78 metros cuadrados de área techada y con características de vivienda económica en cuanto a acabados. El diseño posibilita una futura ampliación, empleando la quincha en el segundo piso ó aplicaciones con adobe para el primer piso. Esta casa tiene mejoras tanto en la calidad del adobe como en la estructura, contando con refuerzos horizontales (cañas partidas formando parrillas, colocadas cada tres o cuatro hileras, a lo largo de los muros), y verticales (cañas que van desde la base hasta la viga superior), que proporcionan excelentes propiedades antisísmicas. Es adaptable en su arquitectura, de acuerdo a las necesidades familiares, así como a la disponibilidad de materiales locales. Esta casa es el producto de la investigación realizada en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas del Departamento de Ingeniería de la Universidad.

Figura 4 – Vista panorámica de la Casa Ecológica 2017

5.2 Biohuerto familiar

Con la finalidad de contribuir a la autosuficiencia alimentaria del poblador del campo se ha desarrollado un biohuerto familiar para la producción de hortalizas, frutas, menestras y otros elementos básicos de una dieta balanceada.

Figura 5 – Vista del biohuerto de la Casa Ecológica

Entre las principales características del Biohuerto se encuentran la utilización de abono natural, producido a partir de los desechos biodegradables generados por el mismo biohuerto y el control biológico de plagas, evitándose el uso de pesticidas químicos para los cultivos.

6 Divulgación y Sostenibilidad

El proyecto ha superado con creces el número de visitantes esperado, por lo que la divulgación de las opciones que brinda la Casa Ecológica está garantizada. Un punto importante a tenerse en cuenta es que el 30% de los visitantes que viene buscando una solución se han enterado por otras personas que ya nos han visitado anteriormente; el 65% nos visita por que ha tenido acceso a alguna de nuestras publicaciones (revista América Renovable, folletos técnicos, etc.) u otra publicación en la que haya aparecido la Casa Ecológica.

En el año 2007 la Casa Ecológica PUCP gana el Premio Energy Globe a nivel mundial y en el año 2012 la Casa Ecológica Andina vuelve a ganar este reconocido premio.

Como consecuencia de la difusión del proyecto se ha logrado una gran aceptación por parte del público, con lo cual el GRUPO tiene proyectado crear una red de Casas Ecológicas en el Perú, esto con la finalidad facilitar el acceso a la información por parte de la población cercana a las futuras Casas Ecológicas que se puedan edificar. Ellas servirán para demostrar las tecnologías y se capacitará a la misma población en el uso y aplicación de Energías Renovables. Se tiene planeado en Chanchamayo, Huánuco, Huaraz, Cusco, etc. Permitirá que las familias que empleen las tecnologías apropiadas aumenten su nivel de ingresos. La mayoría de las

máquinas expuestas están destinadas al aumento de la productividad, dándole valor agregado a sus productos (agroindustria a pequeña escala, cultivos orgánicos, energía eficiente, etc.).

Figura 6 – Premio Energy Globe Casa Ecológica Andina 2012

http://www.energyglobe.info/en/world2012/

Se pretende incrementar el nivel de vida de las familias campesinas, reduciendo sus gastos y brindándole otras comodidades (comunicaciones, radio, TV, teléfono, iluminación), usando recursos no convencionales para la satisfacción de sus necesidades energéticas.

Así podemos lograr disminuir la dependencia tecnológica de nuestros pueblos a través de tecnologías apropiadas acordes con la conservación de la naturaleza.

7 Tecnologías introducidas

Entre las necesidades primordiales de las familias del sector rural se encuentran: agua para consumo humano, riego y saneamiento, iluminación, energía para la cocción de alimentos, calentamiento de agua y calefacción, infraestructura básica de saneamiento, así como energía para los procesos agrícolas entre otros.

Para la satisfacción de estas necesidades, se han desarrollado equipos que emplean fuentes de energía renovables tales como agua, viento, sol, biomasa y tracción animal. Estas fuentes garantizan que no se contaminará el ambiente y que el usuario no tendrá gastos de operación como combustible o electricidad.

Las tecnologías que se desarrollaron en estos últimos 25 años y que han sido elegidas por los propios usuarios como “sostenibles” se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 – Tecnologías desarrolladas

Las bombas de ariete	*Bombas de ariete*
	Bombas de ariete de plástico
Las bombas manuales	*Bombas manuales de pistón*
	Bombas de soga
	Bombas de pedal
	Bombas sube y baja
Las aerobombas	*Aerobomba MCTB 500*
	Aerobomba Gaviotas
Las bombas solares	*Bombas con paneles fotovoltáicos*
Ruedas hidráulicas para bombeo	*Norias*
	riobombas
Los paneles fotovoltáicos	
Los aerogeneradores	*Aerogeneradores WAIRA*
	Aerogeneradores
Ruedas hidráulicas para electricidad	
Las termas solares	
Los hornos y cocinas solares	
Las cocinas solares parbólicas	
Los concentradores solares	
Los secadores solares	*Secadores solares de maíz*
	Secadores solares de hierbas y frutas
Los invernaderos	
Los Muros trombe	
Cocinas mejoradas a leña y bosta	*Cocinas a leña y bosta*
	Termococinas

En cada una de estas máquinas podemos distinguir las distintas formas de enseñanza de cada uno de los equipos, según las siguientes actividades: EXHIBICION (Solamente se puede observar el equipo en funcionamiento), DEMOSTRACION (Los alumnos interactúan con el equipo, haciéndola funcionar directamente) y TALLER (Los alumnos trabajan en el tema, vinculando la teoría y la práctica.)

Para cada uno de estos temas se han diseñado fichas educativas que son reforzadas por paneles demostrativos de fácil comprensión para los visitantes y, actualmente, se están editando manuales de construcción de los equipos con un lenguaje al alcance de todas las personas de bajo nivel educativo y un tour virtual.

Toda esta información se promueve a través de la “Tiendecita Verde”, local comercial que

funciona con energía solar, y especializado en promocionar tecnologías relacionadas con el medio ambiente y las energías renovables a través de la venta de libros, CDs, sotfwares, juguetes educativos, etc. y que funciona dentro del área de la Casa Ecológica PUCP.

Figura 7 – Tiendecita Verde dentro del campus universitario

8 Casas Ecológicas en el Perú

A raíz de la difusión de la Casa Ecológica PUCP varias nuevas Casas Ecológicas han ido construyéndose en diferentes partes del Perú, teniendo cada una de ellas las tecnologías necesarias para su funcionamiento sostenible en el clima en el que se encuentra, dentro de éstas tenemos:

8.1 Casas Calientes Limpias

Proyecto elegido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Perú CONCYTEC como proyecto bandera del año 2016. Actualmente este proyecto cuenta con más de 600 casas calientes instaladas por el GRUPO en Cusco y Puno y en el año 2017 se está transfiriendo la tecnología al gobierno peruano para su masiva instrucción en las zonas más frías del Perú a través del Fondo de Cooperación para el Desarrollo FONCODES. En el año 2017 se están construyendo más de 1,000 casas calientes en la zona de Puno a más de 4,000 msnm.

Figura 8 – Infografía de las Casas Calientes Limpias PUCP

Figura 9 –Casas Calientes Limpias PUCP en Cusco

Casa Ecológica Andina

La Casa Ecológica Andina del GRUPO PUCP está ubicada en el distrito de Langui, Provincia de Canas, Región Cusco, Perú a 3,969 m.s.n.m.

Mejorar las condiciones de vida (vivienda, salud, energía y agua) a través del uso de tecnologías apropiadas que utilizan energías renovables.

Esta casa se trabajó con la ONG PROSYNERGY, es un centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en tecnologías apropiadas que involucran energías renovables, ambientales, sanitarias, constructivas y agropecuarias. Está ubicado en el distrito de Huancano, Pisco a 500 m.s.n.m.

Figura 10 –Casas Ecológica Andina en Cusco

Casa Ecológica de Costa

Figura 11 – Esquema de Casa Ecológica en Pisco

Figura 12 –Casas Ecológica en Pisco

8.2 Casa Ecológica de sierra

También se trabajó con la ONG PROSYNERGY, para la implementación de un centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en tecnologías apropiadas que involucran energías renovables, ambientales, sanitarias, constructivas y agropecuarias. Está ubicada en el distrito de Pilpichaca, Huancavelica a 3,000 m.s.n.m.

Figura 13 –Casas Ecológica en Huancavelica

8.3 Casa Ecológica Tropical

La Casa Ecológica Tropical o Granja Ecológica está ubicada en Huyro, Provincia de La Convención, Región Cusco, Perú a 1,200m.s.n.m

Figura 14 –Casa Ecológica Tropical en la ceja de selva en Cusco

Figura 14 –Planta de Café Solar en la Granja Ecológica Tropical

8.4 Casitas autosuficientes PUCP

En el año 2014 y 2016 se construyeron dos casas, una de adobe antisísmico con mallas de plástico y otra de madera de dos pisos. En esta última, se continúa el trabajo para que los abastecimientos de energía eléctrica, agua y desagüe sean completamente independientes del sistema en red y de cualquier lugar o clima. Actualmente estamos en el proceso de validación e introducción de nuevas tecnologías ecológicas para logra el 100% de autosuficiencia energética.

Figura 15 –Casita autosuficiente PUCP en Lima

Figura 16 –Casita autosuficiente de madera en Lima

9 Conclusiones

En este siglo XXI donde el tema del medio ambiente llegará a ser el eje principal en el desarrollo de las actividades humanas, el tema de la educación ambiental y las energías renovables toman ya un papel primordial y preponderante para el futuro de la humanidad. Este trabajo pretende dar un punto inicial para inculcar a nuestros niños sobre las nuevas tecnologías limpias que gobernarán la Tierra en los próximos años, proporcionando el conocimiento necesario sobre el funcionamiento de estas tecnologías e inculcarles la conciencia ecológica de tal manera que esta nueva juventud conozca la existencia de soluciones limpias para mejorar nuestras condiciones de vida, especialmente utilizando las tecnologías apropiadas, limpias y sostenibles que nos brindan las energías renovables.

El Proyecto Casa Ecológica PUCP, a lo largo de éstos 25 años desde su puesta en marcha, ha sabido acumular una serie de experiencias y conocimientos sobre el trabajo dentro del sector rural principalmente y el sector urbano.

Una de las lecciones aprendidas es que el principal agente de cambio dentro de las comunidades del país, debe ser el beneficiario directo de nuestras tecnologías o conocimientos. El trabajo intervencionista o extensionista ocasiona que las innovaciones o recomendaciones

que se puedan hacer para mejorar la calidad de vida de los usuarios no lleguen a ser incorporados debido a que no se logró un verdadero reconocimiento de sus necesidades, nunca estuvieron de acuerdo con desarrollarlas y/o porque sus costumbres y tradiciones no les permiten adoptar dichas innovaciones.

Para ello, se han desarrollado diferentes casas ecológicas que pueden ser utilizadas específicamente en diferentes regiones del Perú, de acuerdo al clima y características geográficas de cada región, sin afectar el ecosistema y tomando los requerimientos de cada población, donde exista los recursos potenciales para replicar el Proyecto.

Se ha logrado que la Casa Ecológica sea el centro de difusión del empleo de Energías Renovables, lo que nos ha servido para establecer lazos con otras instituciones interesadas en el tema dentro y fuera del país para intercambiar experiencias.

Además, el GRUPO PUCP, representado por sus integrantes, dicta conferencias, charlas y participa en eventos que promueven el uso de Energías Renovables en todo el país.

Las tecnologías del proyecto buscan solucionar los problemas generados por la actividad humana, de una manera sostenible y ambientalmente viables.

Se sabe que nuestro país, está llegando al primer lugar de contaminación en América del Sur, especialmente en contaminación ambiental, producida por la enorme cantidad de materiales tóxicos que se expiden a la atmósfera, principalmente como producto de la combustión de restos fósiles. Este es un grave problema que afecta a la salud de nuestras poblaciones y que el Proyecto pretende solucionar a través de la adaptación de tecnologías que no utilizan la combustión para producir energía o calor.

ambién promovemos el uso eficiente y racional de nuestro recursos, por ejemplo, ahorro de agua (uso eficiente con sistemas de ahorro tipo sifón para inodoros), ahorro de electricidad (uso de focos ahorradores), ahorro de materiales (reducción, reúso y reciclaje de residuos sólidos y líquidos); producción y autoconsumo de alimentos; y, disminución de mermas y pérdidas de alimentos mediante la aplicación de procesos de conservación.

El Proyecto Casa Ecológica PUCP, contribuye de manera efectiva y positiva a la salud de las familias y comunidades, que se desarrollen alrededor de las casas, debido a la utilización de tecnologías limpias y sanas.

10 Referencias

Hadzich M., Ortiz I., Muñoz J.J., Bautista E. (2014). Metodología para la evaluación de la sostenibilidad de innovaciones tecnológicas en ambientes rurales. Tesis doctoral Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

Tapias, H. (1994). Transferencia de Tecnología. Universidad de Antioquia. http://ingenieria.udea.edu.co/producciones/Heberto_t/transferencia_de_tecnologia.html

Pérez M. y Terrón, M. (2004). La teoría de la difusión de la innovación y su aplicación al estudio de la adopción de recursos electrónicos por los investigadores en la universidad de Extremadura. Revista española de Documentación Científica, 27 (3), 308-329.

GRUPO PUCP (1995 – 2001). Revista América Renovable, N.1 – 8

APES – Memorias Congreso Peruano de Energía Solar (1998 –2000 – 2001)

Empresa Luz del Sur - Informe Proyecto Mundo Ecológico (1995 – 2001)

GRUPO PUCP – Boletín electrónico Grupo XXI- Nos. 1 – 22

Hadzich, M. y Vásquez, U. (2003) Educación infantil en energías renovables en Perú. X Simposio Peruano de Energía Solar: Seminario Internacional sobre Tecnologías Económicas para la Descontaminación y Desinfección de Agua. Cusco, Perú.

National Renewable Energy Laboratory (1991) Science Projects in Renewable Energy and Energy Efficiency. American Solar Energy Society, Boulder, Colorado

Authors Profiles

Miguel Hadzich, mechanical engineer of the PUCP. He holds an MBA in Energy and Environment from the University of Twente - Holland. He is a doctoral student at the Polytechnic University of Madrid. He has received the Special Prize for Research of CONCYTEC Peru and the International Energy Globe Award 2007. Main Professor of the Mechanical Engineering Section of PUCP. Director of the GRUPO PUCP. His research interests are in the areas of sustainable development, renewable energies, education and technology transfer

Sandra Vergara, Bachelor of Science with a mention in Mechanical Engineering from the PUCP. She holds an International Diploma in Advanced Specialization in Environmental Management and Technologies from Senai Brasil and INTE PUCP. Coordinator and researcher of the Renewable Energy area of GRUPO PUCP and co-founder of the startup "Rompemuelle bomba". Her research interests are in the areas of sustainable development, renewable energies, education and technology transfer

Embedded generalize predictive controller for a micro-grid DC system

Angie J. Valencia C.
u1801843@unimilitar.edu.co
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

Mauricio F. Mauledoux M.
mauricio.mauledoux@unimiliar.edu.co
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

Oswaldo Rivera R.
u1802050@unimiliar.edu.co
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

Edgar A. Portilla F.
aportilla@ipn.mx
CIDETEC - IPN, Cd. De México, CP 07700, México

Abstract:
The implementation of renewable energy systems is a growing activity, due to lack of nature reserves, the pollution excess, and the continuous demand in the use of energy supply for the common life needs. This means that people must change the way they use the environmental resources to get energy, using instead green recourses as that provided by wind or solar sources. Therefore, this work shows the results obtained by perform a generalized predictive control in an embedded system, as one of predictive control theories in a micro grids system. The data used in the controller design and simulation were collected during a meteorological study made with the weather station of the regional environmental authority (CAR), located in Nueva Granada Military University´s Campus at Cajica, Colombia. This control is implemented because it uses few parameters, and adopts strategies of multi-step prediction, receding-horizon optimization, and feedback correction, which has good tracking characteristic and reduces on-line calculations of control algorithm. Based on the discrete controlled autoregressive integrated moving average (CARIMA) model, the control algorithm was combined with adaptive estimation, which made control system possess of excellent robust and intelligent capability.

Keywords: CARIMA, Generalized Predictive Control, Micro Grids and Renewable Energy.

1 Introduction

Modern society depends on the availability and accessibility to electrical energy, from small to large tasks electrical energy is necessary in our daily living. For many decades, almost all

the electricity consumed in the world has been generated from three different forms of power plant: Fossil, hydro and nuclear [1], nonetheless, issues such as, global warming, the pollution of the air, water and land, the production of acid rain or the health threats caused by burning fossil fuels, have forced society to find new ways to generate electrical energy.

Renewable energies have turned into an efficient, optimal and ecofriendly solution to supply the energy demand across the world, especially inside those areas where electrical energy cannot be taken easily. In Colombia, according to the Mines and Energy Ministry, around 52% territory is not interconnecting to the grid [2], even more, inside these areas, there are 5 main cities of the country, these cities supply their demand of electrical energy through fossil power plants, which increase contamination levels inside those areas. So, how to combat this contamination if energy is essential for daily living? This necessity of generate energy has forced people to take advantage of different kinds of natural resources, available near these areas, solar energy and wind energy are trending to solve this problem.

Then the problem lays on how to improve the efficient and performance of these renewable energies, so here is when terms like Smart grid and micro grid appear. A smart grid is an electrical grid which includes a variety of operational and energy measures including smart meters, smart appliances, renewable energy resources, and energy efficient resources [3], in the other side, a micro grid is a small, independent power system, which increase reliability with distributed generation, efficiency with reduced transmission length and CHP (Combined Heat and Power), at the same time, this kind of grids integrate alternative energy sources easier than conventional grids [4].

Micro grids are an evident solution for non-interconnected zones here in Colombia, this because of the facilities of find renewable energies in our territory. What it's proposed in this article is optimized this kind of application by implementing a Generalized Predictive Control method GPC, this with the final purpose of enhance the micro grid efficiency and minimize the use of alternative energy generators powered by fossil fuels.

GPC is capable of stable control of processes with variable parameters, variable dead-time, and with a model order which changes instantaneously [5]. This method has become one of the most popular Model Predictive Control MPC methods both in industry and academia. It has been successfully implemented in many industrial applications, showing good performance and a certain degree of robustness [6]. We improved the robustness of this controller through CARIMA [7] model application, in this way it ensures an optimal performance of the micro grid. As this system reads the input signals given by the sensors placed in the micro grid, it will know how the performance of micro grid will be, and the controller will determinate how much

current will pass from the alternative energy to the load powered by the micro grid. Instead of having a reactive control which only detects when the load in battery is below of 70%, the predictive controller will anticipate that and will proceed according the previous setup in the micro grid.

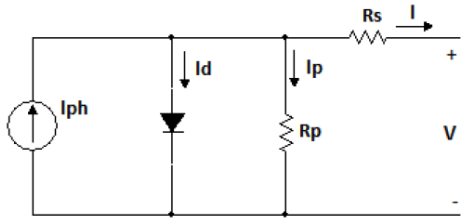
2 Micro-Grid Modelling

To modelling the micro-grid system, it is necessary to define the representation of the power generation subsystem as photovoltaic panels, wind turbine, and storage device.

2.1 Photovoltaic Model

A photovoltaic (PV) module is represented as two nodes electrical circuit with the sunlight emulated as a current source, a diode connected in anti-parallel and a series and parallel resistances, as shown in.

Figure 1 Photovoltaic Model Representation



Then, the equation that defines the PV model dynamics in terms of an output current can be obtained via Kirchhoff's current law, as shown in eq. (1).

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \tag{1}$$

Where I_{ph}, I_d, and I_p are defined in eq. (2), (3) and (4).

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}}\left(I_{ph,ref} + \mu_{sc} \cdot \Delta T\right) \tag{2}$$

$$I_d = I_o\left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1\right] \tag{3}$$

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \tag{4}$$

Where G is the irradiance, G_{ref} is the irradiance at Standard Conditions, T_c is the cells temperature, thus $T = T_c - T_{c,ref}$ ($T_{c,ref} = 298K$) and μ_{sc} is the coefficient temperature of short circuit.

2.2 Wind Turbine Model

To model a wind turbine starts defining the static and mechanical characteristics. The tip-speed ratio (TSR), denoted by λ, is the radio between the linear speed as shown in eq. (5), calculated by the rotor radius and angular speed.

$$\lambda = \frac{r_r \cdot w_r}{V_w} \tag{5}$$

The TSR and the user-defined blade pitch angle, are used to calculate the rotor power coefficient, denoted by C_p as shown in eq. (6) [8].

$$C_p = \frac{P_r}{P_w} \tag{6}$$

Where P_w is defined as the power of wind and P_r is the power of rotor. Finally, the state equation is presented in the eq. (7), with the output in the current i_g.

$$\begin{bmatrix} \dot{w_{re}} \\ \dot{\theta_{re}} \\ \dot{i_g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_r}{J_r} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{L_I}{L_g} & 0 & -\frac{R_{rot}}{L_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{re} \\ \theta_{re} \\ i_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_{re}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_r \tag{7}$$

2.3 Battery Model

The Battery model can be expressed by the open circuit voltage (Voc) or electromotive force (EMF) E_o, the battery voltage V_t, the internal resistance R_i, the discharge current i and the state of charge (SOC) Q as shown in the eq. (8) and (9).

$$E = E_0 - K\frac{Q}{Q - \int i\, dt} + A_e^{-B\int t\, dt} \tag{8}$$

$$V_t = E - R_i \cdot i \tag{9}$$

Where Q is the maximum battery capacity, A is the exponential amplitude, K is the polarization voltage constant and B is the time constant inverse capacity.

The battery voltage obtained is given by eq. (10).

$$E_{batt} = E_o - K\frac{Q}{Q - it} - R_i - K\frac{Q}{Q - i} \cdot\ i^* + A_e^{-B \cdot it} \tag{10}$$

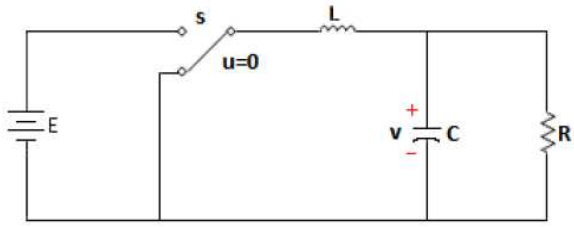
Where it means the current battery voltage $and\ i^*$ is the filtered current.

2.4 Buck Converter Model

The typology of Buck converter is shown in Figure 2, with a power switch S, inductor L and capacitor C. The resistance R represents the load on the battery circuit.

The dynamic process of the circuit can be described by the ordinary differential eq. (11) and (12).

Figure 2 Buck converter diagram



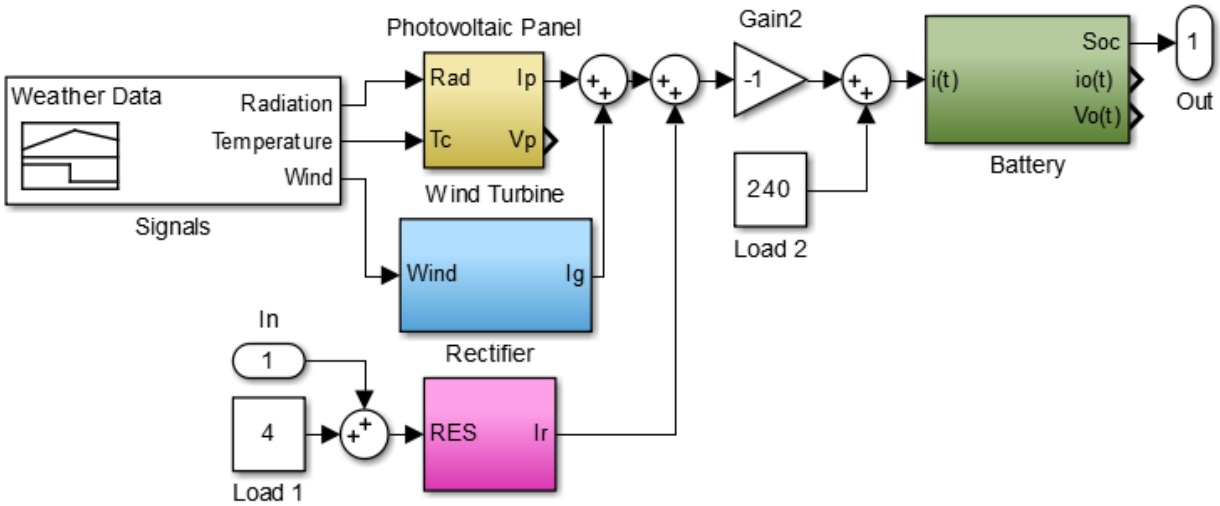
$$L\frac{di}{dt} = -v + Eu \tag{11}$$

$$C\frac{dv}{dt} = i - Rv \tag{12}$$

3 Micro-Grid System

The micro-grid was designed to be modeled as shown in Figure 3.

Figure 3 Micro Grid Representation



When the individual renewable source representation is obtained, it is integrated into the micro grid to get the final mathematical model, in this case is required the application of linearization techniques that provides a lot of insight about its dynamics. From above, Matlab provide a Linear Analysis tool, helpful to get the linearization model using the simulink representation as shown in Figure 3. In this tool is required define the operating point, in this case we use the model initial conditions as shown in Table 1.

The toolbox show the space state, the zero-pole gain and the transfer function representation, but in this case, it is implemented the transfer function in the eq. (13), to calculate a generalized predictive control.

Table 1: Model Initial Conditions

Condition	Value
Wind Turbine	0.0001
Battery model	498960
Buck Converter	1
Photovoltaic Panel	0

$$G(z) = \frac{\begin{array}{c} 1.474 \cdot 10^{-5}z^5 - 5.826 \cdot 10^{-6}\, z^4 \\ -3.998 \cdot 10^{-6}z^3 + 2.052 \cdot 10^{-6}z^2 \\ +2.573 \cdot 10^{-7}z + 1.848 \cdot 10^{-13} \end{array}}{\begin{array}{c} z^6 - 2.089z^5 + 1.46\, z^4 - 0.3732z^3 \\ +0.002089z^2 - 1.641 \cdot 10^{-9}z \\ +6.203 \cdot 10^{-14} \end{array}} \tag{13}$$

Then, it is run the linear analysis again, to obtain the transfer function of measurement disturbances model, as shown eq. (14).

$$G(z) = \frac{\begin{array}{c} -0.0009315z^5 + 0.0008896z^4 \\ +0.0004736z^3 + 6.094 \cdot 10^{-5}z^2 \\ -0.0003445z - 0.0001481 \end{array}}{\begin{array}{c} z^6 - 2.089z^5 + 1.46z^4 \\ -0.3732z^3 + 0.002089z^2 \\ -1.641 \cdot 10^{-9}z + 6.203 \cdot 10^{-14} \end{array}} \tag{14}$$

4 CARIMA Model in a GPC with Measurement Disturbances Model

The common SISO transfer function model in GPC is the CARIMA model, because it considered the uncertainty that could have a non-zero steady state in its representation, so in eq. (15) is shown its mathematical expression [9]. Where $\varsigma_k = 0$ means a random variable and $T(z)$ is treated as a design parameter. For convenience the CARIMA model can be expressed as shown eq. (16), where $[a(z)\Delta]$ is a combination between $a(z)$ and delta (Δ), and Δu_k use input increments with $\Delta = 1 - z^{-1}$ [10, 11].

$$a(z)y_k = b(z)u_k + d(z)v_k + T(z)\frac{\varsigma_k}{\Delta} \tag{15}$$

Where $d(z)v_k$ is the representation of disturbances transfer function. For convenience, the CARIMA model can be expressed as is shown in eq. (16), where $[a(z)\Delta\,]$ is a combination between $a(z)$ and delta (Δ), Δu_k use input increments and Δv_k use disturbances increments with $\Delta = 1 - z^{-1}$.

$$[a(z)\Delta]y_k = b(z)[\Delta u_k] + d(z)[\Delta v_k] + T(z)\varsigma_k \tag{16}$$

Another way to represent the CARIMA model is through eq. (17). In SISO models the $b(z)$ and $A(z)$ are given by the numerator and denominator of transfer function as shown in eq. (18) and (19). While $d(z)$ are given by the numerator of disturbance model as is shown in eq. (20) [15].

$$A(z)y_k = b(z)[\Delta u_k] + d(z)[\Delta v_k] + T(z)\varsigma_k \tag{17}$$

$$b(z) = b_1 z^{-1} + \cdots + b_m z^{-m} \tag{18}$$

$$A(z) = 1 + A_1 z^{-1} + \cdots + A_n z^{-n} \tag{19}$$

$$d(z) = d_0 + d_1 z^{-1} + \cdots + d_p z^{-p} \tag{20}$$

In this step, it is use the same recursively concept integrated the $d(z)$. To have an appropriate notation it is considered the system in terms of matrix and vectors as shown in eq. (21).

$$y_{k+1} = H \overset{\Delta}{\rightarrow} u_k + P \overset{\Delta}{\leftarrow} u_{k-1} + E \overset{\Delta}{\rightarrow} v_k + G \overset{\Delta}{\leftarrow} v_{k-1} - Q y_{\leftarrow k} \tag{21}$$

Where $H = C_A^{-1} C_b$, $P = C_A^{-1} H_b$, $= C_A^{-1} C_d$, $G = C_A^{-1} H_d$ y $Q = C_A^{-1} H_A$. The H, P, E, G and Q, matrix dimension are determinates by the prediction and control horizons.

4.1 Control Law

To develop a GPC law algorithm the unbiased cost (J) as shown in eq. (23) is defined. Where $e_{k+1} = r_{k+1} - y_{k+1}$, and λ is a constant value between 0 and 1, that determines the controller robustness.

$$J = e_{\rightarrow k+1}^T e_{k+1} + \lambda \Delta u_{\rightarrow k}^T \Delta u_{\rightarrow k} \tag{23}$$

It must consider the same unbiased cost showed in eq. (15). Consequently, we can perform a minimization to find the optimum J value. So, considering the eq. (23), is necessary replace it to get a representation with the past and future values as shown in eq. (24) [12].

$$J = \begin{array}{c} \left[r_{\rightarrow k+1}^{T} - P^{T} \overset{\Delta}{\leftarrow} u_{k-1} - E^{T} \overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k} - G^{T} \overset{\Delta}{\leftarrow} v_{k-1} + Q^{T} y_{\leftarrow k}\right] \\ \cdot \left[r_{\rightarrow k+1} - P \overset{\Delta}{\leftarrow} u_{k-1} - E \overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k} - G \overset{\Delta}{\leftarrow} v_{k-1} + Q y_{\leftarrow k}\right] + \\ \left[\left(H \overset{\Delta}{\rightarrow} u_{k}\right)^{T}\right] \cdot \left[H \overset{\Delta}{\rightarrow} u_{k}\right] - \left[2\left(H \overset{\Delta}{\rightarrow} u_{k}\right)^{T}\right] \\ \left[r_{\rightarrow k+1} - P \overset{\Delta}{\leftarrow} u_{k-1} - E \overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k} - G \overset{\Delta}{\leftarrow} v_{k-1} + Q y_{\leftarrow k}\right] \\ + \lambda \Delta u_{\rightarrow k}^{T} \Delta u_{\rightarrow k} \end{array} \tag{24}$$

Considering the above equation, it can eliminate the past terms because they do not affect the values that should be minimized in the optimization rule.

In the optimization of the cost function J exist an only minimum defined by a gradient equal zero, so the optimum is given by eq. (25).

$$\Delta u_{\rightarrow k} = \begin{array}{c} (H^{T} H + \lambda \cdot I)^{-1} H^{T} \cdot \\ \left[r_{\rightarrow k+1} - P \overset{\Delta}{\leftarrow} u_{k-1} - E \overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k} - G \overset{\Delta}{\leftarrow} v_{k-1} + Q y_{\leftarrow k}\right] \end{array} \tag{25}$$

The control law equation is determinate by a k constant defines by the first row of matrix $(H^{T} H + \lambda I)^{-1} H^{T}$ multiply by $\Delta u_{\rightarrow k}$ as shown in eq. (26) [13].

$$\Delta u_{\rightarrow k} = \begin{array}{c} k \cdot (H^{T} H + \lambda \cdot I)^{-1} H^{T} \cdot \\ \left[r_{\rightarrow k+1} - P \overset{\Delta}{\leftarrow} u_{k-1} - E \overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k} - G \overset{\Delta}{\leftarrow} v_{k-1} + Q y_{\leftarrow k}\right] \end{array} \tag{26}$$

To design a block diagram simulation is required unpack each term of the u_k equation in vectors as shown in eq. (27). Then the GPC control law is summarized as is shown in eq. (28).

$$\begin{array}{c} P_{r} = k \cdot (H^{T} H + \lambda \cdot I)^{-1} H^{T} \\ D_{k} = P_{r} P \\ N_{k} = -P_{r} Q \\ R_{k} = P_{r} E \\ S_{k} = P_{r} G \end{array} \tag{27}$$

$$\Delta u_{k} = P_{r} r_{\rightarrow k+1} - D_{k} \Delta u_{k} - R_{k} \overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k+1} - s_{k} \overset{\Delta}{\leftarrow} v_{k} - N_{k} y_{\leftarrow k} \tag{28}$$

The final representation u_k is shown in eq. (29).

$$u_{k} = [(1 - D_{k}) \Delta]^{-1} (P_{r} r_{\rightarrow k+1} - R_{k} \overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k+1} - s_{k} \overset{\Delta}{\leftarrow} v_{k} - N_{k} y_{\leftarrow k}) \tag{29}$$

4.2 T-Filter in a GPC

This filter reduces the high frequency with some loses in low frequencies without change the poles system behavior [14]. To integrate this, in a GPC diagram is used the eq. (30).

$$\tilde{y}_{k+1} = H \overset{\Delta}{\rightarrow} \tilde{u}_k + P \overset{\Delta}{\leftarrow} \tilde{u}_{k-1} + E \overset{\Delta}{\rightarrow} \tilde{v}_{k+1} + G \overset{\Delta}{\leftarrow} \tilde{v}_k - Q \underset{\leftarrow}{\tilde{y}_k} \tag{30}$$

Then, it is use the matrices Toeplitz / Hankel to make the relationship between system without and with filter as shown in eq. (31) [18].

$$C_T \tilde{y}_{k+1} + H_T \underset{\rightarrow}{\tilde{y}_k} = y_{k+1} \tag{31}$$

Using the previous equation, the predictions in eq. (32) are solved, to obtain the filters values of $\overset{\Delta}{\rightarrow} \tilde{u}_k$ in eq. (33) and $\overset{\Delta}{\rightarrow} \tilde{v}_{k+1}$ in eq. (34).

$$\tilde{y}_{k+1} = C_T^{-1} \left[y_{k+1} - H_T \underset{\rightarrow}{\tilde{y}_k} \right] \tag{32}$$

$$\overset{\Delta}{\rightarrow} \tilde{u}_k = C_T^{-1} \left[\overset{\Delta}{\rightarrow} u_k - H_T \underset{\rightarrow}{\tilde{y}_k} \right] \tag{33}$$

$$\overset{\Delta}{\rightarrow} \tilde{v}_{k+1} = C_T^{-1} \left[\overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k+1} - H_T \underset{\rightarrow}{\tilde{y}_k} \right] \tag{34}$$

Finally, the predictions in term of filtered and unfiltered data as is shown in eq. (35) are obtained.

$$y_{k+1} = H \overset{\Delta}{\rightarrow} u_k + [C_T P - H H_T] \overset{\Delta}{\leftarrow} \tilde{u}_{k-1} + E \overset{\Delta}{\rightarrow} v_{k+1} + [C_T G - E H_T] \overset{\Delta}{\leftarrow} \tilde{v}_k - [C_T Q - H] \underset{\leftarrow}{\tilde{y}_k} \tag{35}$$

It is used $P_t = [C_T P - H H_T]$, $G_t = [C_T G - E H_T]$ y $Q_t = [C_T Q + H]$ and $\widetilde{D}_k$, $\tilde{S}_k$ y $\widetilde{N}_k$, defined in eq. (36). Considering that $\Delta \tilde{u} = \frac{\Delta u}{T}$ and $\tilde{y} = \frac{y}{T}$, the new signal control is shown in eq. (37) is obtained.

$$\begin{aligned} \widetilde{D}_k &= P_r P_t \\ N_k &= -P_r Q_t \\ \tilde{S}_k &= P_r G_t \end{aligned} \tag{36}$$

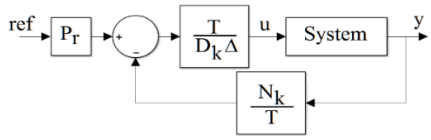
$$u_k = \left[\frac{\widetilde{D}_k}{T} \Delta \right]^{-1} \left[P_r \underset{\rightarrow}{r_{k+1}} - R_k \overset{\Delta}{\rightarrow} \tilde{v}_{k+1} - \frac{\tilde{S}_k}{T} \overset{\Delta}{\leftarrow} \tilde{v}_k - \frac{\widetilde{N}_k}{T} \underset{\leftarrow}{\tilde{y}_k} \right] \tag{37}$$

5 Analysis of results and discussion

Then, the GPC behavior is simulated using the structure in

Figure **4**.

Figure 4. GPC controller simulation diagram.



Considering the above, the block simulation in Simulink/MATLAB is shown in

Figure **5**. Then, it is proposed a control block followed by a switch block that allows charge the battery in specific cases. Then, it is found the rectifier block that give the current to charge the batteries. Finally, it is considered the battery system with measurement disturbances.
To develop the control system, a control horizon of 50, and prediction horizon of 100, with a lambda of 0.5 and a filter of $[1, -0.01]$ is defined. Then, it is obtained as result a charge battery behavior in Figure 6 without disturbances, with a signal control in Figure 7 and rectifier response in Figure 8.

Figure 5. Micro-Grid control diagram

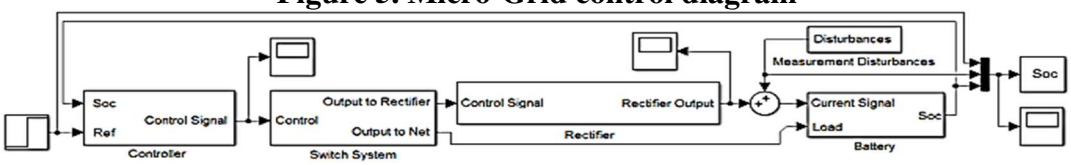


Figure 6. Behavior of Battery Charge

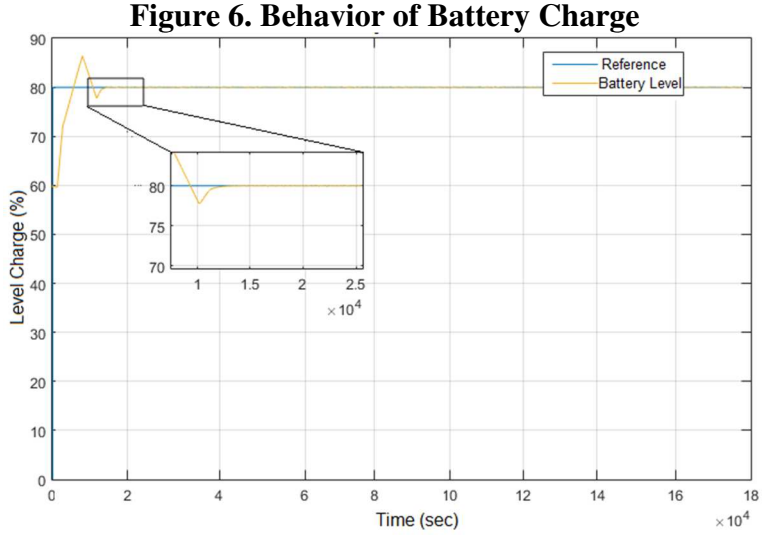


Figure 7. Control Signal without Disturbances

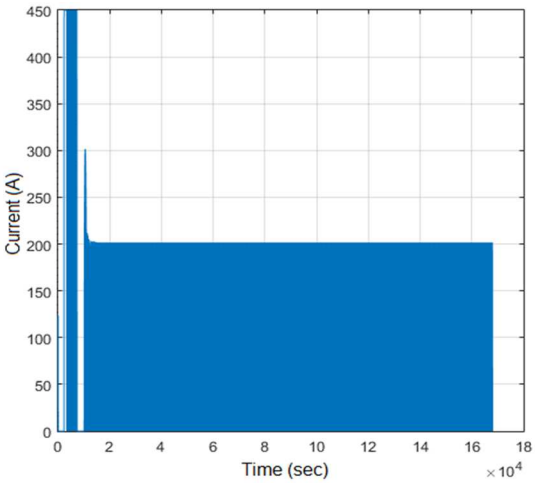
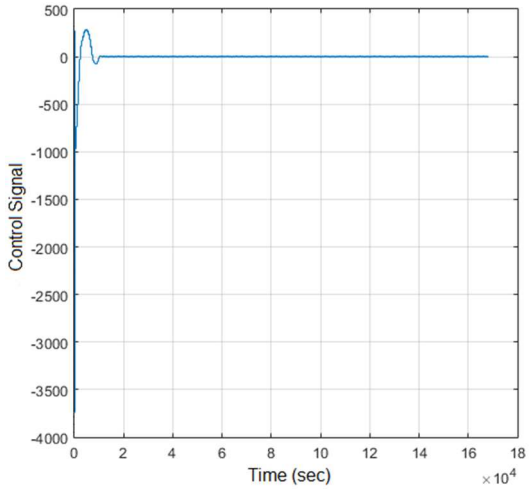


Figure 8. Rectifier Signal without Disturbances



This controller show a response when the charge of battery is 80 %, and initial peak eliminated after $1.4 \cdot 10^4$ seconds. The rectifiers system show a current value of 450 A to reach the reference quickly, then it is stabilizing in 200 A to maintain the battery in the level. When the disturbances are considered, the system, control and rectifier behavior is showed in

Figure **9**,

Figure **10** and

Figure **11**.

Figure 9. Behavior of Battery Charge.

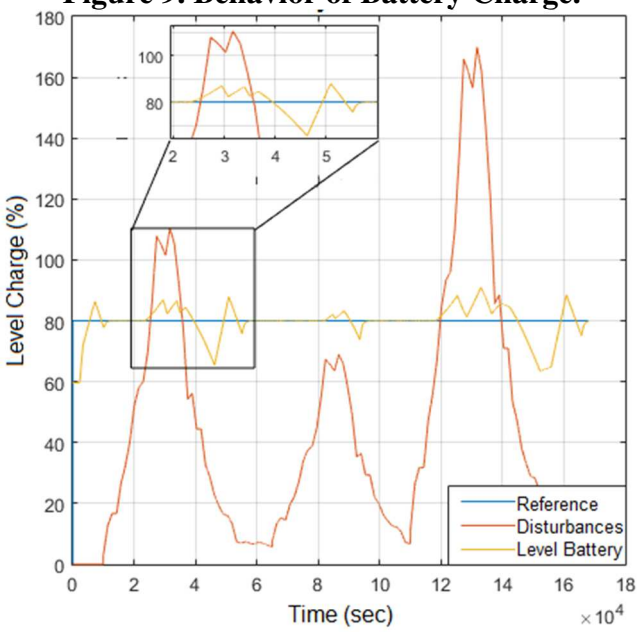


Figure 10. Control Signal with Disturbances.

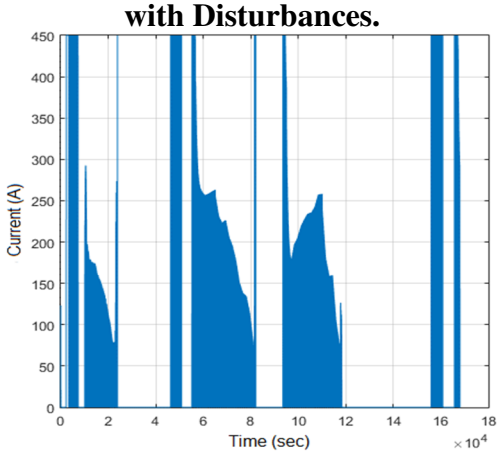
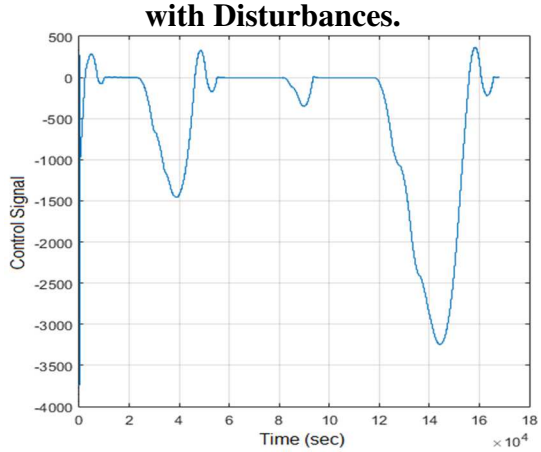


Figure 11. Rectifier Signal with Disturbances.



When the disturbances are applied, the controller mitigate. Obtained the behavior of GPC without disturbances model, it is get the GPC with disturbances model in the

Figure **12**.

When the disturbances are applied, the controller mitigate. Obtained the behavior of GPC without disturbances model the GPC with disturbances model in the

Figure **13**.

Figure 12. Disturbance model in a GPC diagram

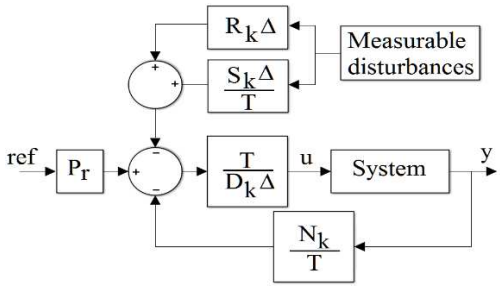
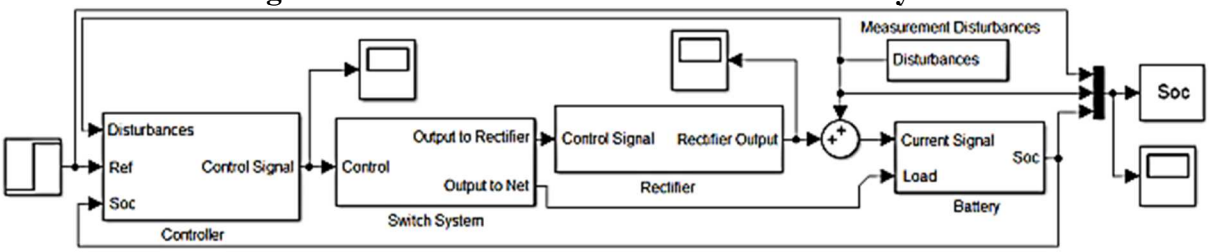


Figure 13. Disturbance model in a Micro-Grid System



To make the control system, a control horizon of 10, and prediction horizon of 110, with a lambda of $1 \cdot 10^{-8}$ and a filter of $[1, -0.001]$ is used. It is obtained as result a charge battery behavior in Figure 14 without disturbances, with a signal control in

Figure **15** and rectifier response in

Figure **16**.

Figure 14. Behavior of Battery Charge

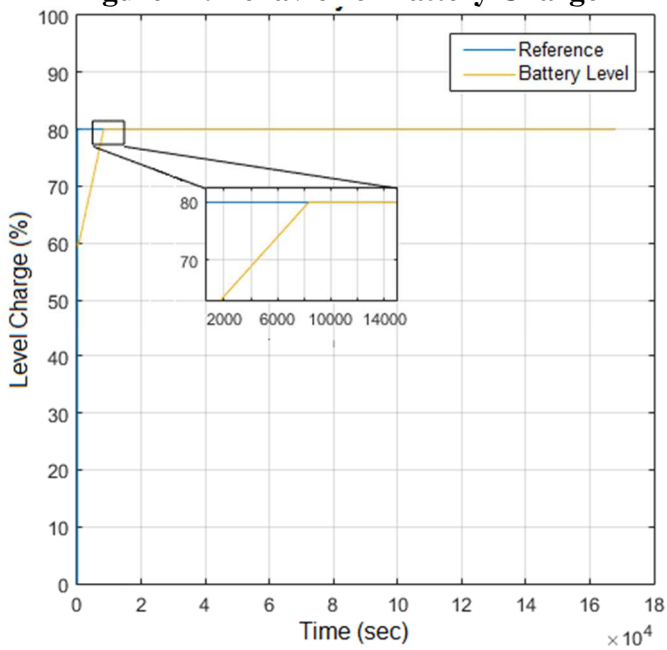


Figure 15. Control Signal without Disturbances

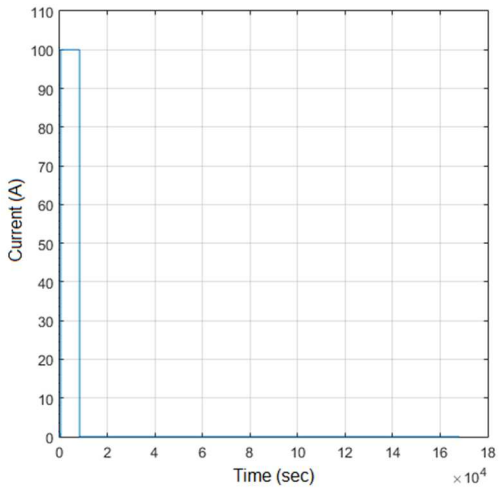
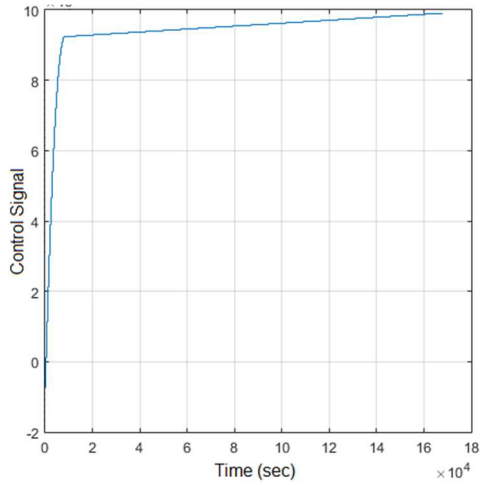


Figure 16. Rectifier Signal without Disturbances



The previous controller show an efficient response because it does not have peaks to stabilize the system, besides it reaches the reference in a optimum time when is compared with the controller without disturbances model.

When the disturbances are considered, the system, control and rectifier behavior in

Figure **17**, Figure 18**Erro! A origem da referência não foi encontrada.** is showed.

Figure 17. Behavior of Battery Charge

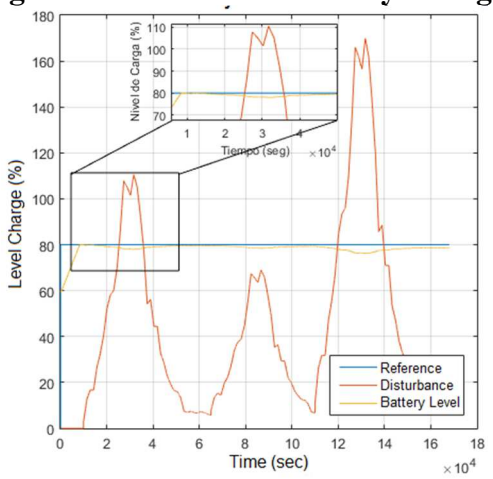


Figure 18. Rectifier Signal with Disturbances

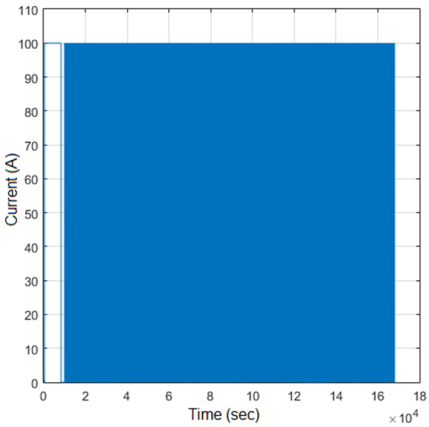
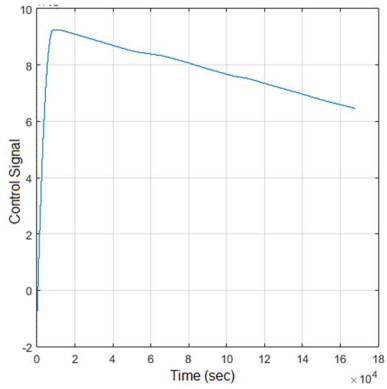


Figure 19. Control Signal with Disturbances



The final response shows a controller able to mitigate the disturbances because it has the disturbances model contemplate into the general control structures.

6 Conclusions

This paper has shown that GPC implemented on a micro grid system is possible and enhance the performance of this kind of systems; taking advantage of the properties of these predictive controllers, it prevents non desire inputs and outputs through defining constraints previously, Drives some output variables to the optimal set points, while maintaining other outputs within specified ranges, between others.

This controller shown an optimal working under disturbances presence and accomplished its aim according the expectations, it was possible to embedded this controller in the micro grid using Simulink/MATLAB and simulate its performance in the micro grid model, it's expecting to apply these methods of prediction improving the efficiency of this micro grids and

minimizing the use of fossil fuels to generate energy. Further works are leading to implementing this controller directly on the micro grid through embedding this GPC inside smaller embedded systems.

7 Referências

[1] W. N. ASSOCIATION, "Electricity generation - what are the options?," [Online]. Available: http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/electricity-generation-what-are-the-options.aspx. [Accessed 03 05 2017].

[2] I. I. d. P. y. P. d. S. E. p. l. Z. n. Interconectadas, "SOLUCIONES ENERGÉTICAS PARA LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA," 2014.

[3] U. S. F. E. R. Commission, "Federal Energy Regularoty Commission Assessment of Demand Response & Advanced Metering," 2008.

[4] P. P. Bruce A. Mork, P. P. Wayne W. Weaver and D. o. E. &. C. Engineering, "Smart Grids and Micro-grids, What are they really?," in *The Minnesota Power Systems Conference*, Brooklyn Center, MN, 2009.

[5] D. W. CLARKE, C. MOHTADI and P. S. TUFFS, "Generalized Predictive Control- Part I. The Basic Algorithm," *Automatica,* vol. 23, no. 2, pp. 137-148, 1987.

[6] S. CHIDRAWAR and B. PATRE, "Generalized Predictive Control and Neural Generalized Predictive," *Leonardo Journal of Sciences,* pp. 133-152, 13 July 2008.

[7] K. S. Holkar and L. M. Waghmare, "An Overview of Model Predictive Control," *International Journal Of Control and Automation,* vol. 3, no. 4, 2010.

[8] Y. G. a. J. N. J. C. Y. Tang, "Nonlinear dual-mode control of variable-speed wind turbines with doubly fed induction generators," *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* vol. 19, no. 4, pp. 744-756, 2011.

[9] G. C. J. a. O. Ardrzejw, "Predictive control for industrial applications," *Annual Reviews in Control,* vol. 25, pp. 13-24, 2001.

[10] D. D. Rodriguez Pedro, "Generalized predictive control robustification under frequency and time-domain constraints," *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* vol. 13, no. 4, pp. 577-587, 2005.

[11] W. G. W. W. X. Qiu, "An Improved Generalized Predictive Control Algorithm Based on PID," *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation,* 2008.

[12] D. Q. L. Zhou, "Study of Generalized Predictive Control Scheme and Algorithm Based on Artificial Neural Network," *IEEE International Conference on Information Acquisition,* vol. 7, no. 6, p. 1208–1212.

[13] R. H. X. B. G. HOU, "Application of Improved Generalized Predictive Control to Coordinated Control System in Supercritical Units," *Conference on Industrial Electronics and Applications,* 2014.

Author Profile

Angie Julieth Valencia Castañeda: was born in Bogotá, Colombia, in 1994. She received the B.S degree in Mechatronics engineering from the University Militar Nueva Granada, Colombia, in 2015. In this year, she joined the Davinci Group at the Militar Nueva Granada University, Colombia, as researching assistant. Her current research interests include Control System, Quadrotor prototype, Robotics, and Optimization.

Mauricio Felipe Mauledoux Monroy: was born in Bogotá, Colombia, in 1982. He received the B.S degree in Mechatronics engineering from the Nueva Granada Military University, Colombia, in 2005. In 2008 as a student of the Master in Information Technologies and Intelligent Systems in the St. Petersburg State Polytechnic University, Russia, at the automatic and intelligent distributed control department, he was promoted to a Ph.D. student. In 2011 He received the Ph.D. degree in Mathematical models, numerical methods and software systems (Red Diploma) from the St. Petersburg State Polytechnic University, Russia. In 2012, he joined the Department of Mechatronics Engineering at the Nueva Granada Military University, Colombia, as an Assistant Professor. His current research interests include Robotics, Automatic Control, Multi-agent Systems, Smart Grids and Optimization.

Oswaldo Rivera Rincón: was born in Girardot, Colombia, in 1993. He received the B.S degree in Mechatronics engineering from the University Militar Nueva Granada, Colombia, in 2016. In this year, he joined the Davinci Group at the Militar Nueva Granada University, Colombia, as research assistant. His current research interests include Control System, Robotics, Optimization and Biomechatronics.

Edgar Alfredo Portilla-Flores: Received his B.Sc. in Electronics Engineering in 1992 (Universidad Autónoma Metropolitana from México), an M.Sc. Degree in Mechanical Engineering from the Instituto Tecnológico de Puebla (México, 2002), a PhD in Electrical Engineering from the Centro de Investigacion y Estudios Avanzados of the Instituto Politécnico Nacional (Mexico, 2006) and postdoctoral stay at the Universidade Estadual de Campinas (Brazil, 2012). He is a full-time Research Professor at the Centro de Innovación Desarrollo Tecnológico en Cómputo at the Instituto Politécnico Nacional in Mexico City. His areas of interest are related to the optimum design of mechatronic systems and the application of bio-inspired algorithms for the solution of engineering problems.

Impacto de la normativa ambiental chilena sobre el desarrollo tecnólogico de calefactores a biomasa

Oscar Farías
ofarias@udec.cl
Universidad de Concepción, Chile

Jorge Jiménez
jorgejimenez@udec.cl
Universidad de Concepción, Chile

Carlos Salgado
carlos.salgado@cerylab.cl
Laboratorio de Ensayo Cerylab Ltda., San Pedro de la Paz, Chile

Resumen:
Atualmente, los principales centros urbanos del centro-sur de Chile superan las normas de calidad del aire debido a las emisiones provenientes de la combustión residencial de leña. Esto ocaciona graves problemas en la salud de la población. Para abordar el problema se promulgó una norma de emisión para los calefactores a biomasa que se venden en chile y entró en vigencia en octubre de 2014. Los fabricantes e importadores de calefactores a leña debieron realizar modificaciones en sus diseños a fin de cumplir los requisitos de emisiones de material particulado, eficiencia energética y seguridad. En ensayos realizados previo a la implementación de la norma, utilizando el método EPA 5G y EPA 28, se encontró que los calefactores a leña en el mercado presentaban tasas de emisión de material particulado entre 4 y 20 g/h, mientras la eficiencia térmica era inferior al 70%. Posterior a la entrada en vigencia de la norma, las emisiones de material particulado se redujeron a valores menores a 3,5 g/h, mientas que la eficiencia térmica aumentó por sobre el 70%. Las principales mejoras en los equipos fueron modificaciones en la distribución de aire en la cámara de combustión, uso de materiales refractarios e incorporación de tecnologías de llama invertida.

Palabras clave: calefacción residencial, combustión de biomasa, contaminación del aire, eficiencia energética

Abstract:
At present, the main urban centers of the center-south of Chile exceed the standards of air quality due to the emissions from the residential combustion of firewood. This causes serious health problems in the population. To address this problem, an emission standard for biomass heaters sold in Chile was promulgated and came into effect in October 2014. Manufacturers and importers of wood-fired heaters had to make modifications to their designs in order to meet the new requirements of particulate matter emissions, energy efficiency and safety. In tests conducted prior to the implementation of the standard, by using the method EPA 5G and EPA 28 it was found that the wood heaters present in the chilean market had emission rates of

particulate material between 4 and 20 g/h, while the thermal efficiency was lower 70% After the standard was implemented, particulate matter emissions were reduced to values below 3.5 g/h, while thermal efficiency increased by over 70%. The main improvements in the equipment were modifications in the air distribution in the combustion chamber of the heaters, use of refractory materials and incorporation of inverted flame technologies.

Keywords: air pollution, biomass combustion, energy efficiency, residential heating.

1 Introducción

En las zonas pobladas del sur de Chile los calefactores a leña han sido identificados como una importante fuente de contaminación del aire. La leña es la principal fuente de energía para calefacción residencial y la penetración del uso de calefactores a leña en los hogares de las zonas urbanas varía entre el 44% al 97% (Ministerio de Desarrollo Social, 2013). Se han realizado diversos estudios en ciudades chilenas para caracterizar la contribución de este tipo de fuente a la contaminación observada en las zonas urbanas (Carvacho et al., 2004; Calvo et al., 2002; Tsapakis et al., 2002).

Existe variabilidad en la emisiones de material particulado (MP) para las diferentes tecnologías de calefactores a biomasa. Las emisiones de material particulado de equipos de combustión no controlados pueden ser 10 a 50 veces más altas que los de un calefactor a biomasa con tecnología más avanzada (Johansson et al., 2003; Johansson et al., 2004).

La contaminación del aire causada por la combustión de biomasa afecta a la población expuesta, siendo los niños, adultos mayores y las personas con una afección respiratoria o cardiaca los grupos susceptibles de mayor riesgo para padecer alguna enfermedad o incluso causar muerte prematura. Pope y Dockery (2006) revisaron varios estudios sobre los efectos de la contaminación por material particulado en la salud de la población y concluyeron que es posible establecer una relación consistente entre la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares y las variaciones diarias de la concentración de partículas finas en el ambiente. También se ha estudiado la contaminación del aire generada por la combustión de biomasa para calefacción y cocción de alimentos (Saldiva et al., 2004). Los impactos negativos en la salud y los costos asociados a muertes prematuras son más altos en los países en vías de desarrollo debido a una mayor exposición a los humos de la combustión de biomasa. Claramente, es necesario mejorar las tecnologías de combustión de biomasa de forma tal que

se pueda seguir utilizando este energético, pero con menores impactos negativos en la salud de la población.

Los factores de emisión de la combustión de biomasa están influenciados por la eficiencia de combustión (Ward et al., 1992). Experimentos a escala de laboratorio realizados en cámaras de combustión en condiciones controladas se han utilizado para determinar factores de emisión (FE) y probar distintas tecnologías de equipos a biomasa (Oros et al., 2001; Gonçalves et al., 2012; calvo et al., 2015; Jimenez et al., 2017).

Las estrategias para abordar el problema de la contaminación, generada por la calefacción basada en leña en Chile, se han orientado a regular el contenido de humedad de la leña, promover programas de certificación de emisiones de equipos y mejorar el rendimiento de los equipos a biomasa en términos de emisiones de material particulado, monóxido de carbono (CO) y eficiencia térmica.

Para abordar el problema ambiental de Chile, se promulgó una norma de emisión para los calefactores a biomasa que se venden en el país y entró en vigencia en octubre de 2014. La norma de emisión busca mejorar el desempeño ambiental y energético de los calefactores a biomasa que se comercializan en Chile con el propósito de reducir el impacto en la calidad del aire en las zonas urbanas. Sin embargo, no existe un seguimiento del proceso de adecuación de los equipos al cumplimiento de la norma nacional. El siguiente trabajo evalúa el impacto de la nueva normativa ambiental en los niveles de emisión de material particulado y eficiencia energética de los calefactores a biomasa comercializados en Chile.

2 Normativa para certificación de los calefactores

2.1 Marco legal del proceso

El proceso de regulación se inicia con una nueva norma de emisiones de calefactores a biomasa (D.S. 39/2011 y DS 46/2013), establecida por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Adicionalmente, en año 2012 se promulgó la Ley N° 20.586 que Regula la Certificación de los Artefactos para Combustión de Leña y otros Productos Dendroenergéticos, según la cual se faculta a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) para fiscalizar el proceso de certificación de dichos artefactos. Por otra parte, se asigna al Ministerio de Energía de Chile la responsabilidad de fijar los estándares de eficiencia energética para los calefactores a biomasa.

Para implementar el proceso de certificación fue necesario iniciar la acreditación de Organismos de Certificación (OC) y Laboratorios de Ensayo (LE), a través del Instituto

Nacional de Normalización (INN). Actualmente, la SEC ha autorizado la operación de dos OC y tres LE para realizar el proceso de certificación descrito en la figura 1.

Figura 1 – Proceso de Certificación de calefactores a biomasa

Fuente: SEC (2014)

La entrada en vigencia de la certificación de calefactores a leña se estableció a partir del 1° de octubre de 2014, mientras que la certificación de los calefactores a pellets ha sido exigida a partir del 1° de octubre de 2016. De esta forma, actualmente todos los calefactores a leña y pellets cuya potencia nominal sea igual o inferior a 25 kW deben contar con su certificación correspondiente para ser comercializados en Chile.

2.2 Emisiones de material particulado

La norma chilena de emisión para calefactores a leña y pellets fijó los límites de MP que se indican en la tabla 1. Para la determinación experimental de MP se utilizan los métodos NCH-28 y NCH-5G del Ministerio de Salud (MINSAL), los cuales se basan en el método EPA-28 y EPA-5G de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Los detalles sobre la metodología de medición y características del banco de ensayo se documentan en Jimenez et al. (2017).

Tabla 1 - Límites de emisión de material particulado

Potencia Térmica Nominal (kW)	*Emisión MP (g/h)*
Menor o igual a 8	*2,5*
Mayor a 8 y menor o igual que 14	*3,5*
Mayor a 14 y menor o igualo a 25	*4,5*

Fuente: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile

2.3 Seguridad y eficiencia energética

Los protocolos para la certificación de eficiencia energética (EE) y seguridad de los calefactores a leña y a pellets se realizan a partir de las normas chilenas NCh 3173.Of2009 y

NCh3282.Of2013, respectivamente. Estas normas, basadas en normas europeas, establecen los métodos para determinar temperaturas de seguridad, límites de emisión de monóxido de carbono y eficiencia energética, entre otros. En la tabla 2 se indican los niveles máximos de emisión de CO establecidos en la norma y en la tabla 3 se entregan las clases de eficiencia energética que ha especificado el Ministerio de Energía, en función del rendimiento térmico del equipo. Cabe señalar, que el rendimiento térmico del equipo establece la relación entre el calor que emite el aparato y el calor total introducido en el mismo, durante el periodo de ensayo y la relación se expresa como un porcentaje.

Tabla 2 - Límites de emisión de monóxido de carbono

Tipo de calefactor y potencia	*CO (% a 13% O_2)*
Leña a potencia nominal	*0,3*
Pellets a potencia nominal	*0,04*
Pellets a potencia reducida	*0,06*

Tabla 3 - Clasificación de eficiencia energética para calefactores a leña y pellets

Clase de Eficiencia Energética	*Índice de Eficiencia Energética (Rendimiento)η*
A	$85\% < \eta$
B	$75\% < \eta \leq 85\%$
C	$70\% < \eta \leq 75\%$
D	$65\% < \eta \leq 70\%$

En la figura 2 se muestra un ensayo típico para un calefactor a leña. El banco de ensayo se compone principalmente de una balanza para registrar el decaimiento de la masa de combustible, un tren de muestreo de gases, analizador de gases de combustión, sistema de adquisición de datos para temperaturas de seguridad en triedro y otros. Mas detalles sobre las características del banco de ensayo y la metodología de medición se documentan en Jimenez et al. (2017). Dado el origen diferente de las normas para ensayo de MP y EE, el banco de ensayos mostrado en la figura 2 fue concebido para intercambiar fácilmente el túnel de dilución del sistema de muestreo de gases de salida del calefactor.

Figura 2 – Ensayo de calefactor a leña

Fuente: Gentileza de Cerylab

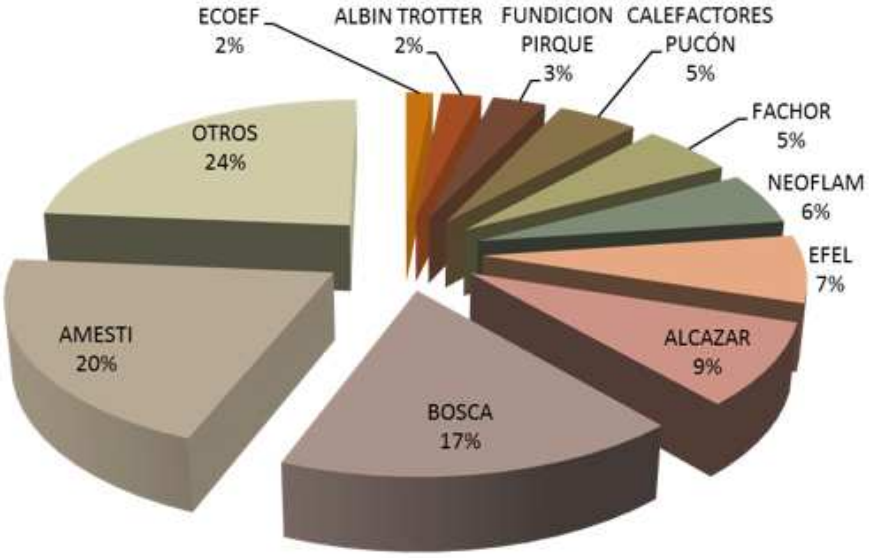
3 Caracterización de los calefactores antes de entrada en vigencia de la normativa

3.1 Mercado nacional anterior a la norma

Previo a la implementación de la normativa de certificación, el mercado chileno contaba con una producción anual de 142.550 calefactores a leña, distribuidos en 127 modelos (Chavarría, 2013). En la figura 3, se aprecia que cuatro fabricantes nacionales concentran la mayor variedad de modelos que se ofrecían en el mercado chileno. De éstos, tres fabricantes se localizan en la ciudad de Santiago y uno en Temuco.

Por otra parte, el año 2010 se contaba con un parque existente de aproximadamente 1,5 millones de calefactores a leña en el sector residencial, distribuidas en las ciudades del centro sur de Chile, con una tasa de incremento de 100.000 nuevas unidades al año. Los calefactores se encontraban principalmente en viviendas de las zonas urbanas y rurales de la región de O'Higgins, Maule, Biobío, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y de Aysén. La región del Biobío y la Araucanía son las que concentran la mayor cantidad de equipos a leña con una participación del 29,6% y 18,8%, respectivamente (Ministerio de Desarrollo Social, 2013).

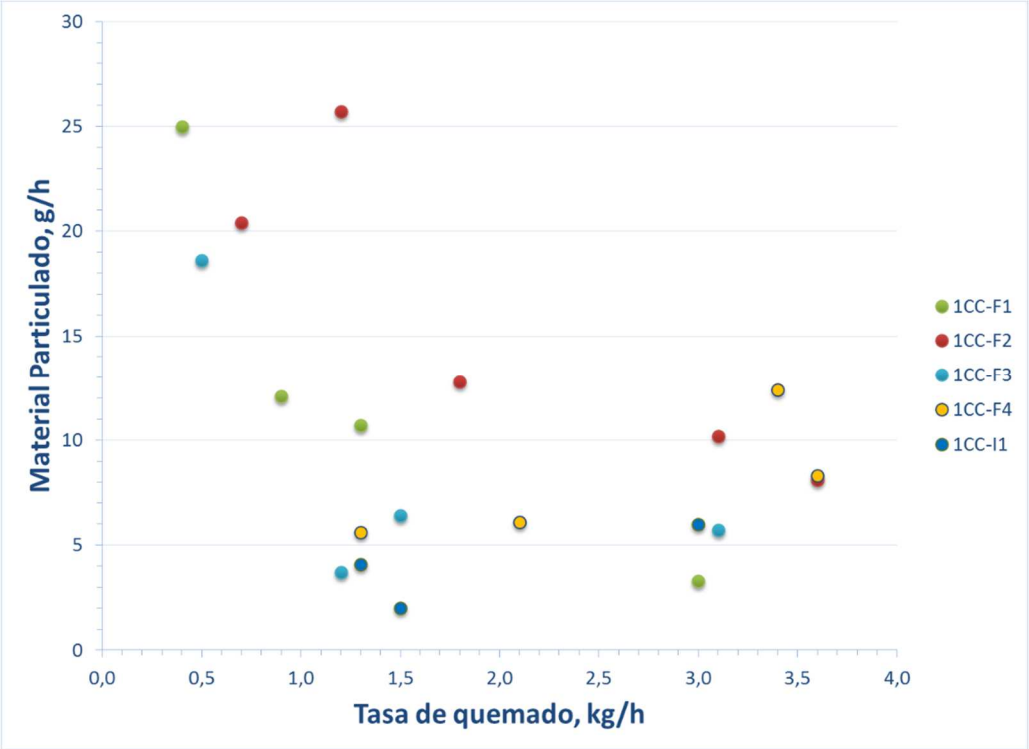
Figura 3 - Distribución por fabricante de modelos de calefactores a leña antes de la certificación



3.2 Desempeño ambiental de los calefactores a leña previo a la entrada en vigencia de la norma

El año 2008, el Depto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción implementó un laboratorio para el estudio y desarrollo de calefactores a leña (Neira, 2009). Se estudiaron y ensayaron 5 modelos de calefactores a leña representativos de las diferentes marcas con presencia en el mercado nacional con el propósito de caracterizar el desempeño ambiental en términos de emisiones de contaminantes del aire y eficiencia energética. La figura 4 muestra los resultados de las emisiones de MP en función de la tasa de quemado para los calefactores estudiados, donde la nomenclatura 1CC-Fi corresponde a equipos de combustión lenta y cámara de combustión convencional producidos por el fabricante i. El equipo 1CC-I1 es de similares características pero de procedencia extranjera (importado). En la figura se observa que los niveles de emisión de material particulado son mayores para las tasas de quemado más bajas, alcanzando valores de MP sobre los 25 g/h. Esto se puede explicar por la restricción del aire primario para combustión afectando negativamente la eficiencia de combustión y por ello la generación de mayores tasas de emisión de contaminantes del aire (MP) producto de la combustión incompleta de la biomasa.

Figura 4 - Emisiones de MP vs tasa de quemado para calefactores a leña en el mercado chileno, año 2011



La tabla 4 muestra los resultados de operación de los calefactores bajo condición de potencia nominal, donde se observa que sólo el equipo 1CC-F1 cumple el requerimiento de CO máximo especificado en la tabla 2. Por otra parte, sólo el calefactor 1CC-F4 alcanza la categoría eficiencia energética C, mientras el resto se clasifican entre los niveles D y E.

Tabla 4: Características operación calefactores a leña en el mercado chileno, año 2011

Equipo	*T (°C) humos*	*Exceso aire (%)*	*Potencia (kW)*	*CO (%)*	*Rendimiento %*
1CC-F1	*490*	*122*	*8,3*	*0,20*	*53,4*
1CC-F2	*432*	*73*	*10,3*	*0,53*	*67,0*
1CC-F3	*481*	*94*	*9,3*	*0,35*	*60,6*
1CC-F4	*415*	*45*	*13,0*	*0,52*	*73,1*
1CC-I1	*410*	*152*	*10,6*	*0,41*	*58,7*

Los resultados anteriores muestran el bajo desempeño ambiental de las tecnologías de calefactores a leña fabricados en Chile para el mercado local, los cuales superaban ampliamente los límites de emisión de MP, mientras que los niveles de eficiencia energética de la mayoría de los equipos se encuentra bajo el 70% señalado como límite inferior en la norma NCh3173. Con la entrada en vigencia del nuevo estándar de desempeño para los calefactores a biomasa,

tanto los fabricantes como importadores debieron enfrentar importantes desafíos para adecuar las tecnologías para dar cumplimiento a la normativa ambiental, reduciendo en forma importante las emisiones de MP y CO. Particularmente, se observa un aumento significativo de las emisiones de MP al operar los calefactores a tasas de quemado inferiores a 1,25 kg/h, debido a una inadecuada regulación del aire de combustión que hace que los equipos tiendan a ahogarse en regulación mínima. Este tipo de comportamiento ha sido característicos de varios modelos de calefactores de combustión lenta, tanto los de cámara simple y aquellos que incluyen un sistema de templador para crear una zona de postcombustión de los gases (Farías et al., 2010; Farías e Salgado, 2013).

Otro desafío tiene que ver con mejorar la eficiencia energética de los calefactores a leña, donde el bajo rendimiento térmico se explicaría por la falta de aislación de la cámara de combustión, el bajo tiempo de residencia de los gases y las altas temperaturas registradas en los humos a la salida de los equipos.

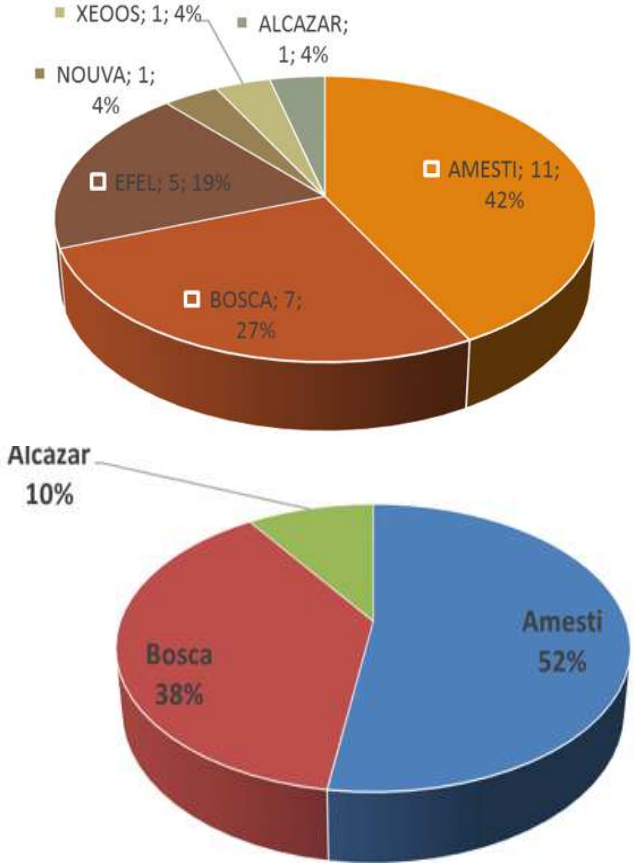
4 Impacto de la aplicación de la norma de emisión en el desempeño ambiental de los calefactores a leña

4.1 Mercado nacional

El proceso de certificación tuvo como consecuencia que la mayor parte de fabricantes pequeños desapareciera del mercado debido a la baja capacidad de desarrollo tecnológico y tecnificación de los procesos de fabricación que no les permitió adaptarse a las nuevas exigencias de desempeño de los equipos de calefacción a leña. En efecto, a octubre del 2015 el número de modelos de calefactores a leña se redujo a 26 (80% con relación a lo señalado en la figura 3) y como se muestra en la figura 5 (izquierda) el mayor número de modelos certificados se concentra sólo en tres fabricantes nacionales. Dentro de los otros productores, llama la atención la aparición de un fabricante de origen Alemán (Xeoos) certificando un calefactor con tecnología de llama invertida. Posteriormente, la empresa NM Chile (fabricante de equipos marca EFEL) desaparece del mercado y emerge la empresa Nouva de Temuco con un modelo de llama invertida.

Actualmente, en febrero 2017 se presentan 21 modelos con certificación vigente SEC y el mercado se concentra en tres empresas nacionales, donde la empresa Alcázar tomó la representación de la marca alemana Xeoos (figura 5, derecha).

Figura 5 - Distribución por fabricante de modelos de calefactores a leña con certificación vigente, año 2015 (izquierda) y año 2017 (derecha)



Por otra parte, en octubre 2016 se inicia el proceso de certificación de calefactores a pellets y a febrero 2017 se registran 7 modelos de calefactores importados certificados. Este tipo de tecnología ha sido fuertemente impulsado por la autoridad ambiental en sus programas de recambio de calefactores antiguos en las ciudades con problemas de contaminación asociada al uso de la leña.

4.2 Características de las nuevas tecnologías de calefactores a leña

Las principales modificaciones introducidas en el diseño de los calefactores convencionales, se generan principalmente en la cámara de combustión e incluyen los siguientes aspectos: mejoras en la regulación y distribución del aire primario y secundario de combustión, combinaciones de vermiculita y ladrillos refractarios para recubrimiento, reemplazo del tradicional templador metálico con ingreso de aire secundario por una placa de vermiculita plana. Por otra parte, se han incorporado al mercado nacional nuevos modelos basados en la tecnología de llama invertida, la cual combina una cámara superior para pirolisis de la leña con una inferior donde se produce la combustión del gas generado en la parte superior para mejorar

las condiciones de combustión. En la figura 6 se muestran fotografías de tecnología pre y post entrada en vigencia de la norma de emisión.

Figura 6 - Cámara de combustión calefactores a leña antiguo (izquierda), nuevo (centro) y de llama invertida (derecha)

4.3 Emisiones y EE de calefactores a leña certificados

A continuación se presenta el análisis de una compilación de ensayos realizados en el Laboratorio CERYLAB Ltda., mostrando los resultados de emisiones y rendimiento térmico obtenidos con las tecnologías de calefactores a leña certificados.

La figura 6 presenta los resultados de MP en función de la tasa de quemado para los calefactores certificados de cámara convencional (1CC-Fi), correspondientes a los mismos fabricantes i caracterizados en la sección 3.2, y también se incluyen equipos certificados de llama invertida (2CC-Fi). El caso del equipo 2CC-I2 corresponde a calefactor de procedencia Alemana. En la figura se observa que los niveles máximos de emisión de material particulado se redujeron en un 80% con respecto a los calefactores existentes previos a la entrada en vigencia de la norma (ver figura 4), e incluso para las tasas de quemado más bajas algunos equipos alcanzan niveles de emisión inferiores a 1,5 g/h. Esto se puede explicar principalmente por una mejor distribución del aire en la cámara de combustión y por la combustión en etapa de los calefactores de llama invertida.

La tabla 5 muestra los resultados de operación de los calefactores certificados bajo condición de potencia nominal. De los equipos de cámara de combustión convencional (1CC), se observa que dos clasifican en la categoría D de eficiencia energética, otros dos en categoría C y uno

alcanza la categoría B. Por otra parte, todos los equipos de llama invertida (2CC) se encuentran en la categoría B de eficiencia energética, con rendimientos del orden del 80%.

Figura 6 - Tasa de emisiones de MP para tecnologías de 1 cámara (1CC) y 2 cámaras (2CC) de combustión

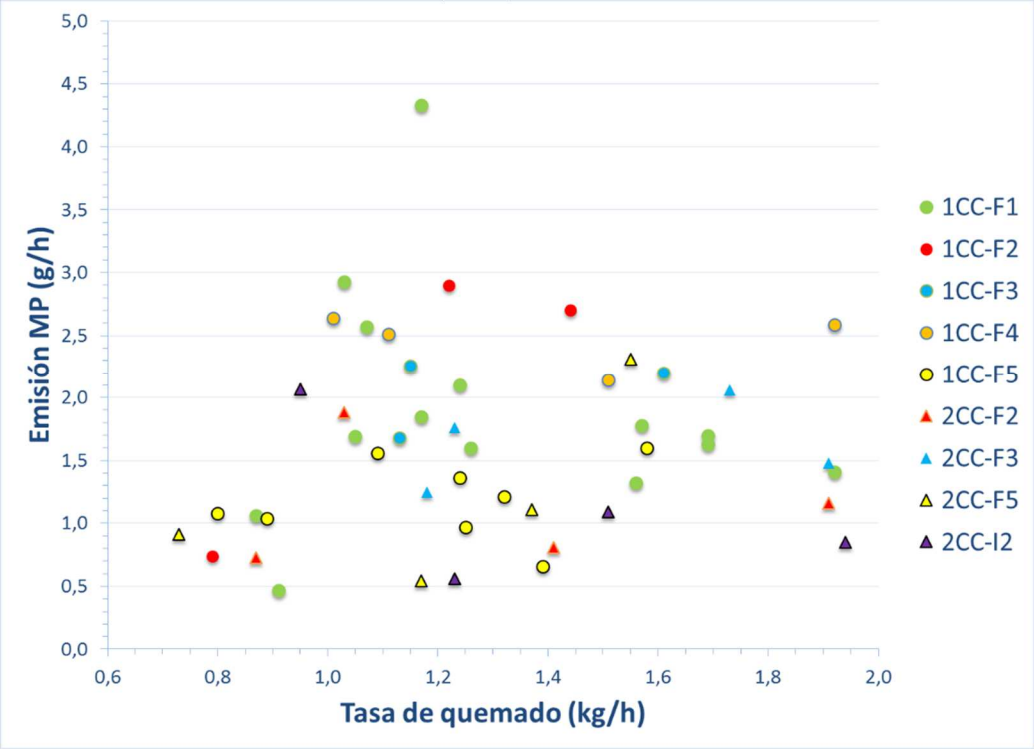


Tabla 5 - Características operación calefactores leña certificados

Equipo	*T (°C) humos*	*Exceso aire (%)*	*Potencia (kW)*	*CO (%)*	*Rendimiento %*
1CC-F1	*413*	*98*	*8,85*	*0,28*	*70,0*
1CC-F2	*382*	*142*	*7,49*	*0,11*	*65,1*
1CC-F3	*426*	*90*	*9,76*	*0,07*	*69,5*
1CC-F4	*325*	*179*	*5,66*	*0,14*	*71,6*
1CC-F5	*261*	*94*	*10,62*	*0,10*	*82,8*
2CC-F2	*271*	*94*	*10,75*	*0,11*	*82,5*
2CC-F3	*221*	*172*	*7,55*	*0,09*	*79,8*
2CC-F5	*211*	*155*	*9,54*	*0,18*	*83,8*
2CC-I2	*263*	*128*	*8,49*	*0,06*	*81,8*

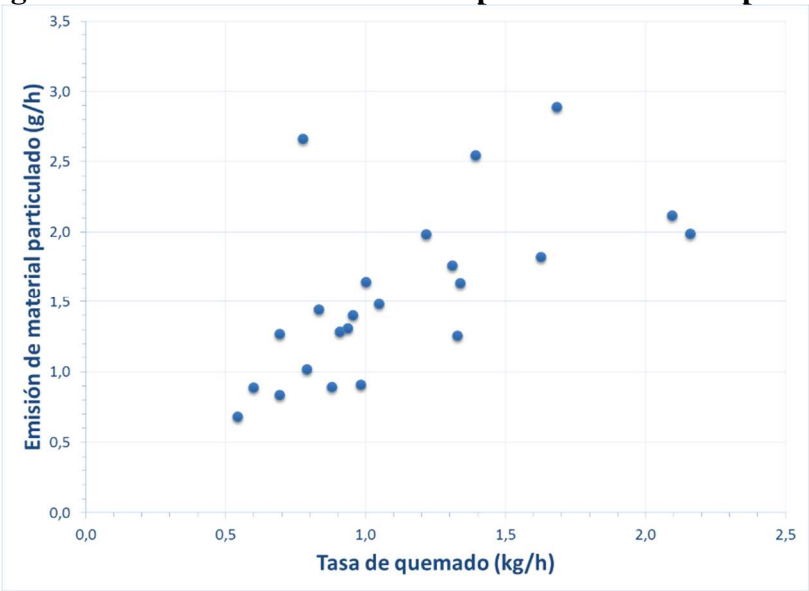
El aumento significativo en la eficiencia energética de los equipos se ve influenciado por la temperatura de salida de y el tiempo de residencia de los gases de combustión en el equipo, además de la inercia térmica asociada a los materiales de los calefactores.

4.4 Emisiones y EE de calefactores a pellets certificados

En la figura 7 se muestran los resultados de MP correspondientes a 5 calefactores de pellets importados, en proceso de certificación. Se observa que la emisión se incrementa con la tasa de quemado, lo cual se puede atribuir a un mayor arrastre de partículas por el aire forzado que ingresa por debajo del quemador.

En la tabla 6 se muestran los resultados de los calefactores certificados para una condición de operación en potencia nominal. De los 5 equipos analizados, 2 presentan niveles de eficiencia energética en categoría B y 3 alcanzan la categoría A con rendimientos sobre el 85%. El mayor rendimiento de estos calefactores, en relación con los de leña, se debe a una mayor transferencia de calor que proporciona el aire forzado de calefacción que interactúa con los gases de combustión en el intercambiador de calor del equipo.

Figura 7 - Tasa de emisiones de MP para calefactores a pellets



Con respecto a las emisiones de CO, los calefactores a pellets generan entre un 3 y 20% de las emisiones correspondientes a calefactores a leña.

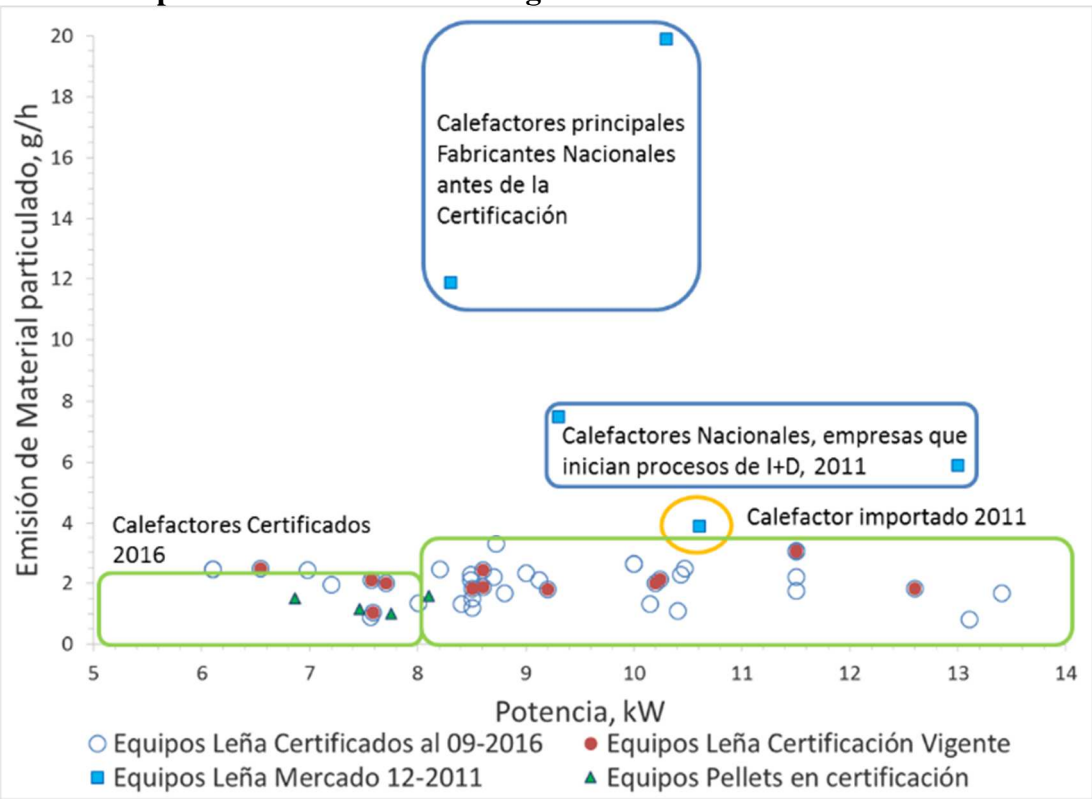
Tabla 6 - Características operación a potencia nominal de calefactores a pellets certificados

Equipo	*Potencia (kW)*	*Rendimiento (%)*	*CO (%)*	*T (°C) humos*
P1	*8,1*	*83,9*	*0,010*	*209*
P2	*6,9*	*86,2*	*0,008*	*202*
P3	*7,5*	*89,3*	*0,012*	*180*
P4	*7,8*	*79,5*	*0,025*	*187*
P5	*8,0*	*89,7*	*0,021*	*164*

4.5 Impacto de la certificación en las emisiones de MP

Al comparar el aspecto y tamaño de las tecnologías de calefactores a leña comercializados, previo a la entrada en vigencia de la norma de emisión, y las nuevas tecnologías certificadas en el país, no se observan diferencias significativas en su apariencia exterior y tamaño. No obstante, como se muestra en la figura 7, los calefactores certificados de potencia nominal inferior a 14 kW, pueden alcanzar tasas de emisión de material particulado inferiores a los 3,5 g/h, cumpliendo con las exigencias de la normativa actual para el rango de potencia. Esto contrasta con las tasas de emisiones de MP de los calefactores antiguos cuyos niveles oscilaban entre 4 y 20 g/h.

Figura 8 - Comparación de emisiones de MP para tecnologías previo y posterior a la entrada en vigencia de la norma de emisión



En la tabla 7 se presentan los valores promedio de potencia y MP, correspondientes a calefactores a leña y pellets certificados hasta febrero 2017. Se aprecia que los calefactores a leña presentan una potencia promedio superior a los a pellets en un 27%, mientras que las emisiones de MP de los equipos a leña sólo superan en un 15% a las de los calefactores a pellets.

Tabla 7 - Valores promedio de potencia y emisiones de calefactores a leña y pellets certificados

Tipo de calefactor	*N.° muestras*	*Potencia (kW)*	*Emisión MP (g/h)*
Leña	*50*	*9,34*	*1,91*
Pellets	*6*	*7,34*	*1,66*

Fuente: Elaboración propia a partir de información SEC (2014)

5 Conclusiones

El trabajo contribuye a la literatura existente aportando con antecedentes sobre el impacto de la norma de emisión chilena en el desempeño ambiental de los calefactores a biomasa que se ofrecen en el mercado chileno. Se observaron cambios significativos en las tasas de emisiones de material particulado con la entrada en vigencia de la nueva normativa Chilena. Esto permitió establecer un estándar mínimo de desempeño en cuanto a tasas de emisiones de contaminantes del aire y eficiencia energética para los calefactores a leña que se comercializan en el mercado nacional. La reducción de tasas de emisiones de material particulado y el aumento en la eficiencia energética del calefactor se logró mediante mejoras en la regulación y distribución del aire primario y secundario de combustión, uso de vermiculita y ladrillos refractarios en la cámara de combustión y el reemplazo del tradicional templador metálico con ingreso de aire secundario por una placa de vermiculita plana. A pesar de estos cambios en el diseño de los equipos no se observaron diferencias significativas en la apariencia exterior y tamaño de los calefactores de la nueva generación, en comparación a los calefactores antiguos.

Sin embargo, la entrada en vigencia de la norma de emisión, junto con el proceso de certificación de los equipos a leña, como requisito para la comercialización en el mercado nacional tuvo como consecuencia que la mayor parte de fabricantes pequeños desapareciera del mercado debido a la baja capacidad de diseño e ingeniería en sus procesos de fabricación

6 Referências

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2012). Establece Norma De Emisión De Material Particulado, Para Los Artefactos Que Combustionen o Puedan Combustionar Leña.y Pellet de Madera. Accedido el 20 de julio de 2016, en: https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1042254.

Calvo, A.I., Marti Tsapakis, M., Lagoudakia, E.,.Stephanou, E., Kavouras, I., Koutrakis, P., Oyola, P. e von Baer, D. (2002). The composition and sources of PM2.5 organic aerosol in two urban areas of Chile. Atmospheric Environment. 36(23): 3851–3863.

Calvo, A., Martins, V., Nunes T., Duarte, M., Hillamo, R., Teinilä, K., Pont, V., Castro, A., Fraile, R., Tarelho, L. e Alves C. (2015). Residential wood combustion in two domestic devices: Relationship of different parameters throughout the combustion cycle. Atmospheric Environment. 116: 72-82.

Carvacho, O., Trzepla-Nabagloa, K., Ashbaugha, L., Flocchini, R., Melın, P. e Celis, J. (2004). Elemental composition of springtime aerosol in Chillan, Chile. Atmospheric Environment. 38: 5349–5352.

Ministerio de Desarrollo Social (2013). Encuesta CASEN. Accedido el 20 de julio de 2015, en: http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/casen-multidimensional/casen/casen_2013.php.

Chavarría, G. (2013). Factibilidad técnico-económica de un laboratorio de ensayo de artefactos a biomasa. Memoria de Título, Depto. Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción. 151 pp.

Farías, O., Jiménez, J. e Neira, L. (2010). "Análisis comparativo de una estufa a leña de doble cámara con una estufa a pellets. XIV Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica. Universidad de La Frontera, Pucón.

Farías, O. e Salgado, C. (2013). Desarrollo de Calefactores a Leña para adaptarse a la nueva Legislación Energética y Ambiental en Chile. XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Plata, Argentina.

Gonçalves, C., Alves, C. e Pio C. (2012). Inventory of fine particulate organic compound emissions from residential wood combustion in Portugal. Atmospheric Environment. 50: 297-306.

Jimenez, J., Farias, O., Quiroz, R. e Yañez, J. (2017). Emission Factors of Particulate Matter, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Levoglucosan from Wood Combustion in South Central Chile. Journal of the Air & Waste Management Association. 67: 806-813.

Johansson, L.S., Tullin, C., Leckner, B. e Sjövall, P. (2003). Particle emissions from biomass combustion in small combustors. Biomass Bioenergy. 25: 435-446.

Johansson, L., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C. e Potter, A. (2004). Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. Atmospheric Environment. 38: 4183-4195.

Neira, L. (2009). Implementación de un banco de ensayo para optimización de sistemas de calefacción con biomasa. Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción. 165 pp.

Oros, D. e Simoneit, B. (2001). Identification and emission factors of molecular tracer in organic aerosols from biomass burning, Part 1. Temperate climate conifers. Applied Geochemistry. 16(13): 1513-1544.

Pope, C.A. e Dockery, D.W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. Journal of Air & Waste Management Association. 56: 709-742.

Saldiva, P. e Miraglia, S. (2004). Health effects of cookstove emissions. Energy for Sustainable Development. 8(3): 13-19.

Tsapakis, M., E. Lagoudakia, E. Stephanou, I. Kavouras, P. Koutrakis, P. Oyola e D. von Baer. (2002). The composition and sources of PM2.5 organic aerosol in two urban areas of Chile. Atmospheric Environment 36: 3851–63.

Superintendencia de Electricidad y Combustibles (2014). Calefactores a leña. Accedido el 18 de octubre de 2014 en: http://www.sec.cl/portal/page?_pageid=33,4841677&_dad=portal&_schema=PORTAL.

Ward, D., Susott, J., Kauffman, J., Babbitt, R., Cummings, D., Dias, B., Holben, B., Kaufman, Y., Rasmussen, R. e Setzer, A. (1992). Smoke and fire characteristics for Cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B Experiment. Journal of Geophysical Research 97: 14601-14619.

Authors Profiles:

Oscar Farías has received a Ph.D. from the University of Liège – Belgium, Liège in 1997. Is now an Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, of the University of Concepcion – Chile. His research interests are in the areas of Combustion, Energy Efficiency, Innovation and Design of Wood Heaters and Air Pollution Control. Jorge Jimenez has received a Ph.D. from Washington State University – United States, Pullman in 2006. Is now an Associate Professor at the Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, of the University of Concepcion – Chile. His research interest are in the areas of Biomass Combustion, Energy Efficiency, Air Pollution Control and Renewable Energy. Carlos Salgado has received a B.S. in Mechanical Engineering. from the University of Concepción – Chile, Concepción in 2011. Is now an Engineer and Laboratory Chief Cerylab– Chile. His research interests are in the areas of Combustion, Energy Efficiency, Environmental Measurements, Quality Control and Quality Assurance.

Secador solar de milho: Uma alternativa sustentável e segura

Gisele Mol da Silva
g.mols@cefetmg.br
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil

André Guimarães Ferreira
agferreira@cefetmg.br
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil

Cristiana Brasil Maia
cristiana@pucminas.br
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Brasil

Resumo:
O milho é uma das culturas mais importantes no mundo para a alimentação dos seres vivos. O beneficiamento é uma das últimas etapas de produção de grãos sendo, nessa etapa, que o produto adquire as qualidades físicas, fisiológicas e sanitárias que serão responsáveis por sua classificação em padrões comerciais. No intuito de manter o índice de qualidade alcançado, diversas técnicas são utilizadas, dentre elas a secagem, sendo esta fundamental para preservar a qualidade do milho, uma vez que a presença excessiva de umidade no grão favorece sua deterioração. A secagem pode ocorrer de forma natural, ocasionando variações em seus resultados. Também pode ser realizada por secadores que apresentam diferentes configurações e podem elevar o custo do produto. Além disso, determinados secadores geram impacto ambiental e colocam em risco a segurança das pessoas, produtos e instalações. Este artigo apresenta uma descrição da evolução dos processos de secagem desse alimento, abordando prós e contras de cada processo. Tem por objetivo elucidar e disseminar o uso do secador solar como alternativa para a secagem do milho visando a preservação do meio ambiente, a utilização de fonte energética renovável, gratuita e abundante em várias localidades e a segurança operacional da instalação. Poderá, ainda, difundir o uso do secador solar para secagem de outras culturas, podendo ser empregado tanto em pequena ou larga escala.

Palavras-chave: Alternativa sustentável, milho, secador solar, segurança operacional.

Abstract:
Corn is one of the most important crops in the world for the living beings feeding. The beneficiation is one of the last stages of the grain production and, in this stage, the product acquires the physical, physiological and sanitary qualities that will be responsible for its classification in commercial standards. In order to maintain the quality index reached, several techniques are used, among them the drying, which is fundamental to preserve the quality of the corn, since the excessive presence of moisture in the grain favors its deterioration. Drying can occur naturally, causing variations in its results. It can also be performed by dryers with different configurations and may raise the cost of the product. In addition, certain dryers generate environmental impact and endanger the safety of people, products and

installations. This paper presents a description of the evolution of the drying processes of this food, addressing the advantages and limitations of each process. Its objective is to elucidate and disseminate the use of the solar dryer as an alternative for the drying of corn in order to preserve the environment, use of a renewable, free and abundant energy source in several locations and operational safety of the facility. It can also spread the use of the solar dryer to dry other crops, being used on a small or large scale.

Keywords: Corn, operational safety, solar dryer, sustainable alternative.

1 Introdução

O crescimento demográfico, a urbanização crescente e o êxodo rural são alguns dos fatores que têm levado profissionais e produtores à busca de tecnologias voltadas para melhorar a conservação dos produtos agrícolas (Elias, 2015).

Ainda que se invista no aumento da produtividade para suprir a demanda alimentar mundial, pouco se tem investido na conservabilidade dos grãos produzidos. Essa necessidade de trabalhar a conservação de grãos fica nítida ao se avaliar o potencial agrícola e a grande perda da produção decorrente de falhas nos processos de secagem e armazenamento (Elias, 2015).

O milho é uma das principais espécies cultivadas no mundo. Ainda que seu cultivo tenha sido inicialmente desenvolvido para atender ao consumo humano, atualmente o principal destino das safras são as indústrias de rações para animais (Santos, 2012). Em relação ao consumo humano, o milho necessita ser processado, exceto quando se encontra em estado leitoso. O processamento ocorre nas indústrias moageiras, podendo a moagem ser realizada a seco ou úmido. A moagem seca também é empregada em pequenas propriedades devido a sua simplicidade, sem requerer grandes investimentos tecnológicos.

Grande parte da produção de grãos é proveniente de pequenos e médios produtores, que utilizam depósitos, galpões ou paióis tecnicamente deficientes para armazenagem dos grãos, expondo os mesmos a ataques de insetos, ácaros, roedores e fungos. Em particular, quando esse último se desenvolve nos grãos pode ocasionar a produção de micotoxinas, gerando riscos para a saúde dos consumidores (homem e animal) além de reduzir o valor comercial do produto.

O armazenamento dos grãos, sem que os mesmos estejam adequadamente secos, também estimula o metabolismo dos próprios grãos, provocando deteriorações e perda de qualidade. Além disso, umidade e temperatura elevadas nos locais de armazenamento potencializam

esses efeitos. No caso do milho, dependendo do subproduto e da forma como o mesmo é obtido, soma-se a necessidade imprescindível de que os grãos a serem processados estejam suficientemente secos, permitindo que o milho seja transformado em pó fino sem que o produto fique empastado.

Saber o momento certo para a colheita é uma das fases de maior importância na produção do milho. A colheita do milho, independentemente de ser manual ou mecanizada, deve respeitar a maturidade fisiológica da cultura. Deve acontecer quando o milho atinge entre 18 a 25% de umidade, isto se o milho for submetido ao processo de secagem antes de ser armazenado (Magalhães e Durães, 2006). Entretanto, a irregularidade das safras bem como a falta de recursos leva os agricultores, principalmente de pequenas e médias escalas que não dispõem de equipamentos para secagem do milho, a optarem por manter a cultura no campo - secagem de grãos de maneira natural - mesmo após a maturidade fisiológica.

Elias (2015) sugere que o atraso da colheita seja evitado, uma vez que podem ocorrer perdas quantitativas e qualitativas, exposição a intempéries e maior tempo de uso da terra. Porém, no caso de não ser possível a utilização de nenhum sistema de secagem pós-colheita, nem mesmo o natural, de modo geral, produtos classificados como proteicos, que é o caso do milho, devem ser colhidos com umidade mais próxima possível a 13%. Magalhães e Durães (2006) recomendam que quando não existe estrutura de secagem na propriedade a colheita ocorra quando os grãos apresentam de 13 a 15% de umidade. Teixeira (2016) assegura que a umidade ideal para armazenamento do milho deve ser abaixo de 13,5%, pois em umidades inferiores, a maioria dos fungos que atacam o grão praticamente interrompem seu desenvolvimento.

De forma sucinta, sempre que houver a possibilidade de secar o produto após a colheita, por exemplo por meio de secadores, deve-se dar preferência para esta alternativa. Parâmetros como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem, bem como taxa de secagem, espessura do produto e teor de água inicial e final interferem na cinética de secagem do mesmo. O sistema de secagem utilizado também é determinante nos resultados desta operação.

Quanto às implicações do processo de secagem sobre a qualidade do produto, Lima e outros (2014) estudaram os efeitos imediatos (após o processo de secagem) e latentes (ao longo do armazenamento) na qualidade química e tecnológica de grãos de milho, decorrentes das temperaturas de secagem do ar a 60, 60/80 e 80°C, até atingir a umidade final de 13%. Após nove meses de análises concluiu-se que é possível secar o grão de milho com temperatura do ar de secagem de até 80°C, podendo a temperatura final da massa de grãos

chegar a valores médios de 48ºC sem interferir na qualidade e sem ocasionar perdas quantitativas e qualitativas ao milho.

Apesar dos avanços tecnológicos pós-colheita, a secagem ainda é praticamente o único método utilizado para a conservação de grãos em grande parte do mundo (Elias, 2015). Todavia, existem diferentes sistemas de secagem, podendo ser utilizada energia oriunda da queima de lenha, da queima de combustíveis fósseis ou, ainda, pelo uso de eletricidade ou de energia proveniente do sol para o aquecimento do gás de secagem, sendo a última mais utilizada na secagem tradicional de grãos e sementes, ou seja, expondo o produto a céu aberto sob condições ambientais normais (Machado e outros, 2011).

Lima e outros (2014) mencionam que a escolha pelo uso da lenha se deve, principalmente, ao fato do baixo custo, porém o controle da temperatura do ar de secagem é bem mais difícil com variações maiores e, consequentemente, maiores riscos de danos aos grãos.

Machado e outros (2011) expõem uma abordagem ambiental, relatando que o uso de energias fósseis eleva os índices de poluição, sendo necessária a busca pela utilização de fontes de energia limpa e renovável. Os mesmos afirmam que o uso de secadores solares se mostra como uma alternativa viável para atender aos pequenos, médios e grandes produtores, pois é uma energia limpa, gratuita, renovável e, em algumas partes do mundo, abundante.

Assim, esse artigo tem por objetivo apontar aspectos relacionados ao uso do secador solar como alternativa para a secagem do milho tendo em vista questões relacionadas à qualidade do produto após secagem, ao meio ambiente, à disponibilidade e acessibilidade as fontes de energia e à segurança operacional da instalação.

2 Secagem de alimentos

O produtor, sempre que possível, deve realizar a secagem do milho, mas esta nem sempre é uma prática empregada. A secagem de alimentos pode ser definida como a remoção de água ou outro líquido qualquer de um material sólido, através de vaporização térmica, em temperaturas inferiores à de ebulição deste líquido (Ferreira, 2004).

A maior parte da energia consumida durante o processo de secagem é para transformar a água líquida em vapor. A água líquida pode estar contida no produto de diversas formas como, por exemplo, água livre, água ligada, entre outros. A água livre ou não ligada caracteriza que o produto não é higroscópico; a água ligada, por sua vez, encontra-se retida nos capilares fechados sendo o produto considerado higroscópico. A velocidade de secagem está diretamente ligada

com a forma como a água se encontra no produto e é determinada pela temperatura e teor de umidade do produto, bem como pela temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de escoamento (Belessiotis e Delyannis, 2011). De maneira geral, durante o processo de secagem ocorrem as transferências de calor e de massa entre o produto a ser seco e o escoamento de ar, até que se alcance a estabilização do teor de umidade. No caso de produtos agrícolas, que são higroscópicos, a secagem acontece, normalmente, em duas fases distintas:

a) inicialmente, quando a superfície do produto se encontra saturada, a taxa de velocidade de secagem será contínua, enquanto a superfície do produto apresentar água suficiente para ser evaporada. Em certos casos, dependendo da umidade inicial do produto, esta fase não acontece;

b) com a redução da velocidade de secagem, quando a superfície do produto não dispõe mais de vapor saturado, parte do calor do escoamento do ar é transferido para o interior do produto, contribuindo com o processo de transferência de massa, ou seja, migração de umidade do interior do produto para sua superfície. A propagação de umidade é controlada pelo movimento do líquido interno, enquanto a superfície torna-se continuamente empobrecida em água. Esse fenômeno ocorre, em um primeiro momento, quando o teor de umidade do produto ainda é elevado. A medida que a umidade reduz, o produto diminui de volume e, consequentemente, os diâmetros dos poros e dos capilares também reduzem. Assim, a água líquida faz ligações com as partículas sólidas do produto, formando pontes líquidas. Nessas pontes, a água escoa pelas paredes dos capilares e migra com consecutivas condensações e evaporações promovendo a redução da pressão parcial do vapor e a continuada contração do produto, até que se alcance o equilíbrio da umidade entre o produto e o escoamento, interrompendo a secagem. Esse fato ocorre pela transferência da umidade a partir da superfície do produto para o ar circundante, sob a forma de vapor de água.

O desempenho do processo de secagem depende não só das condições do escoamento (temperatura, umidade e vazão), mas também das características do produto, dentre elas o teor de umidade inicial, e da configuração do secador. Entretanto, para a secagem apropriada é necessário que alguns parâmetros sejam limitados e controlados, como por exemplo, a temperatura do escoamento do ar de secagem. Ainda que o aumento da temperatura de escoamento promova a redução da umidade do ar reduzindo o tempo de secagem, esta elevação muitas vezes não é interessante, pois pode afetar a qualidade do produto.

3 Processos de secagem

Os processos de secagem podem ser classificados de diversas formas. Neste item, é apresentada uma descrição dos processos de secagem natural, artificial com ventilação natural e artificial com ventilação forçada, sendo este último subdividido em três outras classes, em função da temperatura do ar de secagem - ar natural, ar a baixas e ar a altas temperaturas. Após uma avaliação dos pontos fortes e limitações de cada um desses processos, é realizada uma análise das fontes de energia utilizadas para o aquecimento do ar de secagem empregado em secadores que trabalham a altas temperaturas, com o intuito de identificar vantagens e desvantagens na aplicação de cada uma delas.

Finalizando, uma descrição simplificada dos tipos de secadores solares é apresentada e, em seguida, são também evidenciadas aplicações práticas do uso de secadores solares na secagem de grãos, mostrando alguns aspectos discutidos neste artigo que favorecem a adoção dos mesmos, tais como preservação do meio ambiente, utilização de fonte energética renovável e gratuita além da segurança operacional das instalações.

3.1 Processos de secagem natural, artificial com ventilação natural e artificial com ventilação forçada

São diversos os métodos de secagem de grãos. A secagem do milho pode ser feita no próprio campo (natural ao sol), em secadores que utilizam a queima de biomassa, derivados do petróleo, energia elétrica e ou energia solar, a fim de promover o aquecimento do ar de secagem. Existe também a secagem natural parcial com posterior secagem mecanizada (Silva, 2008).

A secagem na planta, a secagem em terreiros ou a secagem em plataformas elevadas foram os primeiros métodos utilizados para secagem de grãos e ainda são utilizados até hoje, principalmente em regiões onde o acesso à tecnologia e energia convencional são limitados. Além disso, a falta de recursos para investimentos também contribui para o uso desses métodos primitivos, pois requerem menos capital. A principal vantagem desses métodos é a economia de energia, pois utiliza somente a radiação solar, que tem ação germicida e não são poluentes (Silva, 2008).

A secagem na planta consiste em retardar a colheita até o produto atingir uma umidade próxima a ideal para o armazenamento (Ferrari Filho, 2011). Ocorre naturalmente, após o grão atingir a maturação fisiológica. A movimentação do ar é feita pela ação do vento (Silva, 2008). Esse método é empregado em locais nos quais existem condições favoráveis do clima a época da colheita e, também, naqueles em que não há capital disponível para investimento, sendo mais

comum entre pequenos produtores (Ferrari Filho, 2011). Ferrari Filho (2011) afirma que a secagem natural é um método pouco seguro, pois o produto fica sujeito a condições adversas e ao ataque de insetos, pássaros, roedores e microorganismos que contribuem para sua deterioração. Outra desvantagem apontada é que em condições de altas temperaturas ambientais, especificamente sobre a cultura do milho, o grão possui elevada taxa respiratória, consumindo parte das reservas do produto e comprometendo sua qualidade. Diante disso, Elias (2015) desaconselha o retardamento da colheita, seja pelas perdas quantitativas e qualitativas, pelos riscos de ocorrência de intempéries e pelo maior tempo de uso da terra.

Quando o processo de secagem recebe a interferência do homem, acelerando e melhorando essa técnica, esse processo é conhecido como secagem artificial. Ela pode ser realizada com ventilação natural, ventilação forçada e convecção natural (Silva, 2008).

A secagem solar em terreiros ocorre após o produto ser retirado da planta e espalhado sobre uma superfície plana. É um método que apresenta como desvantagem a dependência dos fatores climáticos que, se adversos, retardam o processo de secagem e propiciam a deterioração do produto. Além disso, apresenta baixa capacidade de secagem, maior necessidade de mão-de-obra e exige extensas áreas planas para construção do terreiro (Silva, 2008).

Na plataforma coberta, os grãos são expostos diretamente ao sol. A barcaça, por exemplo, que possui lastro fixo e cobertura móvel, é o tipo de instalação mais utilizada e recomendada para esse tipo de secagem (Silva, 2008). A plataforma coberta minimiza, mas não elimina, os problemas de condições climáticas adversas e suas consequências.

A secagem com ventilação forçada é um processo de remoção de umidade que utiliza equipamentos e permite o condicionamento do ar de secagem por meio do controle da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem (Cornejo, Nogueira e Wilberg, 2012). Pode ser realizada com ar natural, com ar a baixas temperaturas e ar a altas temperaturas.

A secagem a baixa temperatura utiliza ar sem aquecimento ou levemente aquecido, em até 10°C acima da temperatura ambiente (Silva, 2008). Ambos os métodos, secagem com ar natural e secagem com ar a baixas temperaturas, consistem basicamente na secagem de grãos em silos, sendo que a secagem se inicia na camada inferior do silo e vai progredindo até a parte superior. Existem procedimentos diversos para carregamento do silo que podem influenciar no desempenho do processo de secagem e a taxa de vazão de ar deve ser calculada de forma a não deteriorar o produto. Se bem dimensionados, são métodos econômicos e tecnicamente eficientes (Silva, 2008). Entretanto são processos lentos, pois as baixas velocidades de secagem se devem ao pequeno fluxo de ar insuflado na massa de grãos e a dependência da capacidade de secagem do ar em estado natural. Outro fator limitativo é a dependência das condições

atmosféricas que, se desfavoráveis, implicariam na utilização de ventiladores e sistemas de aquecimento mais potentes, inviabilizando economicamente o método (Silva, 2008).

Já a secagem artificial com ventilação forçada a altas temperaturas consiste no aquecimento do ar a temperaturas superiores a ambiente acima de 10ºC. Utiliza secadores mecânicos a alta temperatura, em que o fluxo de ar quente passa pelo produto absorvendo, com maior capacidade, a umidade deste. Esta técnica tem ficado restrita a produtores que possuem maior poder aquisitivo, pois os investimentos iniciais são onerosos (Silva, 2008). Apresenta a vantagem de ser rápida, não depender das condições climáticas locais, apresentar menor risco de deterioração e facilidade de gerenciamento. O controle dos parâmetros de processo, tais como velocidade, temperatura e umidade do ar de secagem, umidade inicial do produto, entre outros, permitem resultados satisfatórios na qualidade do produto (Silva, 2008).

A tabela 1 sintetiza as características dos processos de secagem apresentados.

Tabela 1 – Características dos Processos de Secagem

Processo	Pontos fortes	Limitações
Secagem natural	. Não necessita de investimentos . Não utiliza equipamentos . Energia gratuita e acessível . Não poluente	. Depende do clima . Perdas quantitativas e qualitativas . Maior tempo de uso da terra . Lento
Secagem com ventilação natural	*Terreiros e plataformas cobertas*	
	. Investimento mínimo . Energia gratuita e acessível . Não poluente	. Depende do clima . Perdas quantitativas e qualitativas . Lento . Maior necessidade de mão-de-obra e extensas áreas planas
Secagem com ventilação forçada	*Ar natural e a baixas temperaturas*	
	. Econômico . Tecnicamente eficiente	. Depende do clima . Lento, devido à baixa velocidade de secagem . Risco de deterioração dos grãos . Necessidade de fonte de energia
	Ar a altas temperaturas	
	. Rápido . Não depende das condições climáticas . Menor risco de deterioração dos grãos . Facilidade de gerenciamento . Possibilidade de controlar o processo . Qualidade do produto satisfatória	. Investimentos iniciais podem ser onerosos . Necessidade de fonte de energia

Diante do exposto e em prol da qualidade do produto, pode-se constatar que o processo mais adequado é a secagem em secadores com ventilação forçada a altas temperaturas. Embora esse processo de secagem contribua com a estabilidade da qualidade do grão, pode elevar o custo do produto, gerar impacto ambiental e colocar em risco a segurança das pessoas. Essas são algumas questões discutidas a seguir.

3.2 Principais fontes de energia utilizadas para aquecimento do ar de secagem

O ar quente realiza a troca de calor com o produto a ser desidratado, promovendo a evaporação da água nele contida que, em seguida, é liberada para o ambiente.

A secagem convencional de culturas requer muita energia na forma de madeira, gás natural, combustíveis de petróleo ou eletricidade (Onyegegbu, Morhenne e Norton, 1994).

Na década de 1970, com o início da crise energética mundial, passou-se a ter uma preocupação com o consumo de combustíveis utilizados para a secagem de produtos agrícolas. A partir de 1973, novas fontes de energia passaram a ser pesquisadas, bem como sistemas de secagem mais eficientes. A seguir, são abordadas algumas características básicas das fontes de energia mais utilizadas na secagem de grãos.

A secagem de grãos com uso de lenha como combustível é, ainda, muito utilizada, principalmente em função do seu baixo custo (Lima e outros, 2014).

Trata-se de um sistema de secagem rápido, porém o controle da temperatura do ar de secagem é bem mais complexo, com maiores riscos de danos nos grãos (Weber, 2005). O manejo inadequado da fornalha favorece certos inconvenientes, como a combustão incompleta, liberando grande quantidade de fuligem, fumaça e resíduos químicos que reduzem a qualidade do grão devido a absorção de fumaça pelos mesmos (Weber, 2005). Além disso, ocorre uma produção de gases ácidos que, por serem corrosivos, atacam as partes metálicas do equipamento e, com isso, diminuem sua vida útil (Martins e outros, 2002).

Outras desvantagens são a demanda de mão-de-obra de forma intensiva para transporte do combustível e alimentação da fornalha, o desmatamento e a necessidade de grandes áreas para cultivo de florestas, além de ter menor eficiência de combustão quando comparada aos combustíveis gasosos (Weber, 2005). A energia elétrica também está presente em sistemas de aquecimento a lenha, por exemplo, para acionamento dos ventiladores (Weber, 2005).

Sistemas de secagem que usam combustíveis gasosos, como o gás liquefeito de petróleo (GLP) e o gás natural (GN), oferecem vantagens como queima limpa e, consequentemente,

menor contaminação de grãos, simplicidade de operação, excelente controle de temperatura favorecendo a automação da secagem, redução expressiva da mão-de-obra, diminuição do tempo de secagem e aumento da qualidade final do grão seco (Portella e Eichelberger, 2001; Miura e outros, 2015). O GLP apresenta, também, facilidade de transporte e armazenamento (Miura e outros, 2015). Outro fato relevante é que a participação do custo da energia elétrica no custo energético total é influenciado pela duração da secagem, ou seja, aumenta com a diminuição da temperatura de secagem ou quando a umidade inicial dos grãos é mais elevada.

Até meados da década de 1970, o óleo diesel era um dos combustíveis mais utilizados na secagem dos produtos agrícolas. A preferência por esse combustível pode ser relacionada à facilidade na logística, a simplicidade no uso e o baixo preço na época (Silva, 2001). A partir de então, a crise mundial energética alterou o contexto de utilização dos combustíveis. Com o aumento do preço do óleo diesel, passou-se a utilização em maior escala dos combustíveis gasosos para a secagem de produtos agrícolas (Silva, 2001).

Essa preferência está também relacionada ao baixo teor de enxofre e a possibilidade do aquecimento direto do ar sem necessidade de trocadores de calor. O enxofre é um elemento indesejável pois propicia a formação de gases tóxicos. Outro fato a ser considerado é que em presença de água, o trióxido de enxofre leva à formação de ácido sulfúrico (H2SO4) que é altamente corrosivo para as partes metálicas dos equipamentos, além de ser poluente.

Quanto ao uso da energia elétrica como combustível para o aquecimento do ar de secagem, pode-se afirmar que é praticamente inviável, devido ao seu alto custo. A mesma, quando utilizada no processo de secagem, presta-se ao acionamento de equipamentos auxiliares como ventiladores, sistema motorizado para revolver os grãos, entre outros. Além disso, em muitas áreas rurais não há disponibilidade de acesso a essa fonte de energia, principalmente em pequenas propriedades.

A partir de 1974, durante a crise do petróleo, surgiu o interesse de usar a fonte de energia solar em substituição as fontes convencionais na secagem de produtos agrícolas (Silva, 2008). Desde então, muitas pesquisas têm sido realizadas a respeito da utilização de energia solar para a secagem de grãos e alguns aspectos apontados para análise da viabilidade do uso desta fonte de energia, tais como o custo inicial dos coletores e a coincidência do período de safras da maioria das culturas com a época das chuvas, ainda que os grãos não estejam expostos diretamente às condições ambientais locais.

Cabe ressaltar, em relação ao custo dos coletores solares, que existem diversas configurações de secadores para grãos (Martins e outros, 2002), podendo, alguns, serem construídos com material e mão-de-obra locais (fácil construção).

O secador solar, quando acoplado a um módulo fotovoltaico, com sistema de armazenamento de energia, dispensa o uso de eletricidade para acionamento do ventilador. Neste caso, pode ser implantado em qualquer localidade, independente da disponibilidade de energia elétrica.

De forma geral, os secadores apresentam várias características comuns, tais como (i) possibilitar o armazenamento de energia para uso quando a radiação solar é inferior a necessária (neste caso, é preciso equipamento auxiliar para armazenamento da energia), (ii) ser um equipamento de fácil operação e de custo de implantação relativamente baixo, compatível, portanto, com a capacidade de investimento da agricultura familiar, (iii) demandar baixa potência elétrica para acionar o motor do ventilador, (iv) utilizar uma fonte de energia renovável, limpa e gratuita, (v) apresentar pouca necessidade de mão-de-obra e, sobretudo, (vi) permitir a secagem dos grãos dentro dos parâmetros de qualidade requeridos.

Apesar dessas inúmeras vantagens, locais com baixa incidência de radiação solar não são apropriados para aplicação desta técnica.

Cabe ressaltar, ainda, que a utilização de sistemas mistos de aquecimento com energia solar fornece uma alternativa para economia de energia, e podem ser adaptados a instalações de pequeno porte (Onyegegbu, Morhenne e Norton, 1994).

A tabela 2 resume as características das fontes de energia utilizadas para aquecimento do ar de secagem.

Tabela 2 – Características das Fontes de Energia Utilizadas para Aquecimento do Ar de Secagem

Fonte de energia	Características
Lenha	. Muito utilizada . Baixo custo . Processo de secagem rápido . Fonte renovável . Menos poluente que os combustíveis fósseis . Combustão pode ser difícil e incompleta . Difícil de controlar a temperatura do ar de secagem aumentando o risco de dano ao grão
Lenha	. Pode reduzir a qualidade do produto devido a absorção de fumaça pelo mesmo . A queima da madeira implica no desmatamento . Exigência de mão-de-obra intensiva . Necessita de grandes áreas para cultivo de florestas . Menor eficiência de combustão (comparada aos combustíveis gasosos) . Uso concomitante de energia elétrica . Possibilidade de danificar o equipamento por corrosão

Fonte de energia	Características
GLP e GN	. Queima limpa e menor contaminação de grãos . Redução da mão-de-obra e simplicidade de operação . Diminuição do tempo de secagem . Aumento da qualidade final do produto . Excelente controle de temperatura . Facilidade de transporte e armazenamento - GLP . Possibilidade de automação da secagem . Custo energético variável e superior a lenha . Participação significativa do custo da energia elétrica no custo energético total
Óleo diesel	. Facilidade na logística e simplicidade no uso . Preço alto . Presença de enxofre em sua composição, liberando gases tóxicos . Necessidade de trocadores de calor para evitar o contato com o ar de secagem . Possibilidade de danificar o equipamento por corrosão
Energia elétrica	. Utilizada para acionamento de equipamentos auxiliares . Alto custo . Não está disponível em qualquer localidade
Energia solar	. Rendimento varia em função do período do ano com maior ou menor incidência de sol . Custo acessível a pequenos agricultores, em função da tecnologia escolhida . Possibilidade de armazenar energia . Equipamento de fácil operação . Demandar baixa potência elétrica para acionar o motor do ventilador ou nenhuma, em caso de optar por tecnologia de sistema fotovoltaico com armazenamento de energia . Fonte de energia renovável, limpa e gratuita . Pouca necessidade de mão-de-obra . Qualidade adequada do produto após secagem . Locais com baixa incidência de radiação solar não são apropriados para aplicação desta técnica . Possibilidade de ser utilizado em sistemas mistos

Diante das considerações apresentadas, na sequência, este estudo enfatiza a utilização da energia solar como fonte de energia para secagem de milho à altas temperaturas.

3.3 Secadores

O processo de secagem pode ocorrer de forma natural ou de forma mecânica, por meio do uso de secadores.

Existem secadores de diversos tipos, podendo ser divididos em artificial, híbrido e solar. O secador artificial utiliza fonte convencional de energia. Já o secador híbrido utiliza pelo menos duas fontes de energia, combinando energia convencional com energia renovável, como solar,

biomassa ou geotérmica. Por fim, o secador solar utiliza a energia proveniente exclusivamente do sol para seu funcionamento.

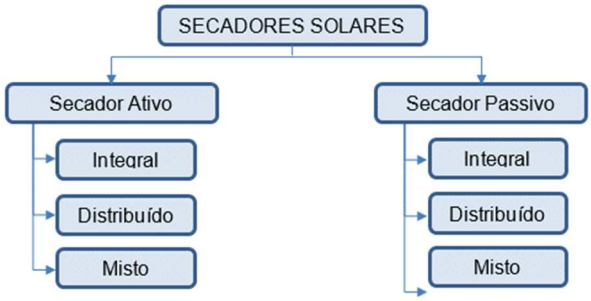
Em geral, os secadores solares, por apresentarem baixo custo de operação e de manutenção dos equipamentos, faz com que essa tecnologia seja cada vez mais disseminada. Outro aspecto que não se pode deixar de enfatizar é o uso da secagem para retardar a degradação dos alimentos, pois em algumas regiões do mundo o desperdício de alimentos pode chegar a 40% da produção (Freitas Neto, 2015).

A literatura apresenta estudos científicos do uso de secadores solares para a secagem de vários produtos, não só alimentares. Busatto e outros (2013) experimentaram secar a madeira Pinus sp. a fim de observar o teor de umidade final e a qualidade da madeira seca, avaliando rachaduras de topo e empenamentos. Teixeira, Silva e Morejon (2012) secaram lodos resultantes dos processos de biodigestão de resíduos domésticos. Silva e Grilo (2012) testaram a secagem da mamona, para reduzir a utilização do cozinhador e aumentar a eficiência na produção de óleo do produto. Ferreira, Gonçalves e Maia (2014) avaliaram a secagem de resíduos sólidos da indústria de arame de aço. Em todos os estudos foram obtidos resultados satisfatórios.

Existem também pesquisas utilizando secadores híbridos que apontam como principal vantagem desta tipologia de secador, em relação aos secadores solares, a possibilidade de manter as condições de secagem uniformes, por meio de sistema auxiliar de energia. Freitas Neto (2015) foi um deles, quando projetou um secador híbrido que utiliza energia solar e energia elétrica para a desidratação de frutas, sendo que o sistema elétrico só entra em funcionamento de forma automatizada quando um sensor de luminosidade aciona o sistema elétrico ligado a resistências. Yassen e Al-Kayiem (2016) avaliaram experimentalmente um secador híbrido interligado a um secador de recuperação suplementar para aproveitamento do calor dos gases de combustão.

Os secadores solares são classificados por Ekechukwua e Norton (1999) em secadores ativos e secadores passivos, conforme apresentado na figura 1.

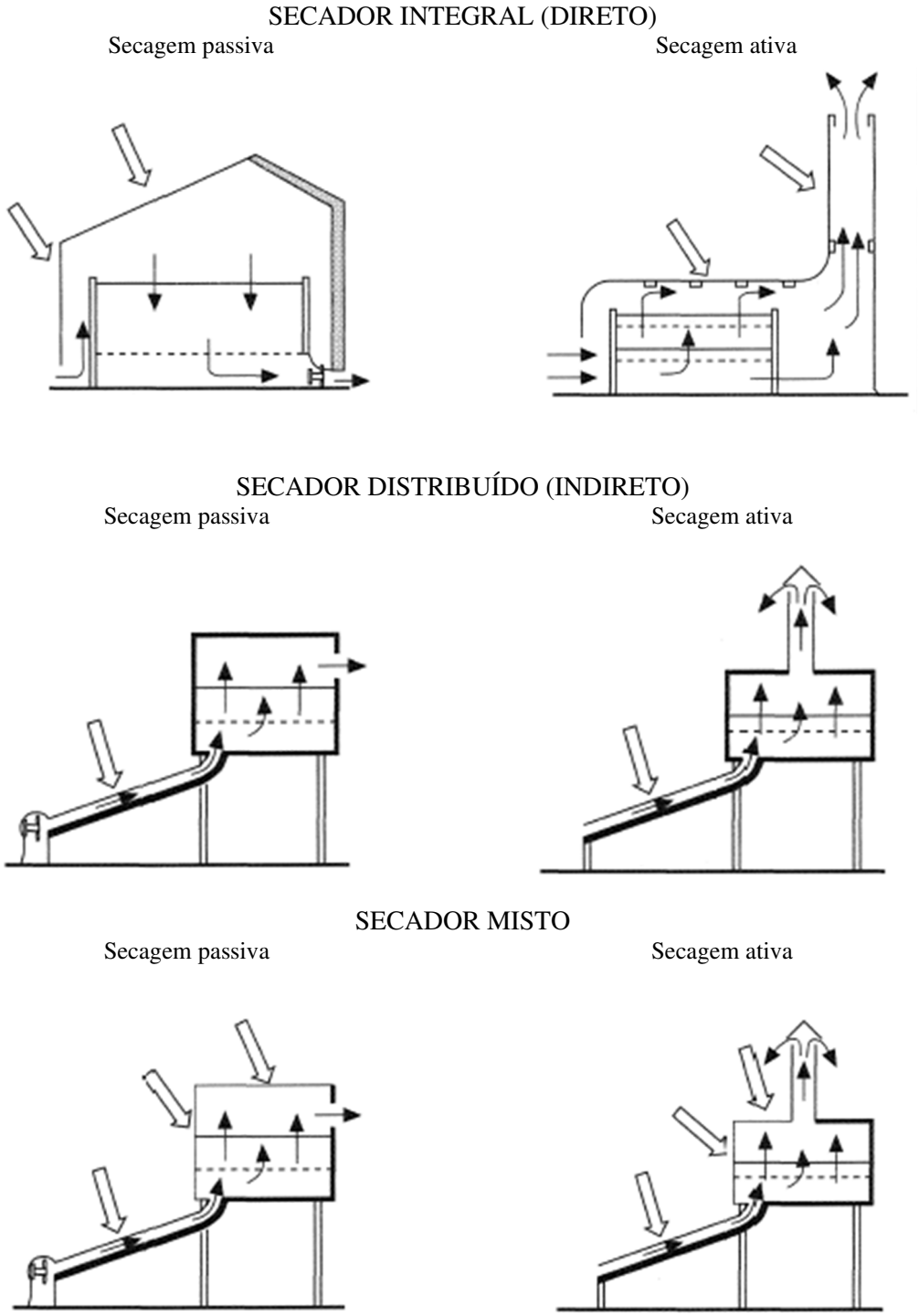
Figura 1 – Classificação dos secadores solares



A figura 2 ilustra esquematicamente os tipos de secadores solares (Ekechukwua e Norton, 1999).

A classificação ativo versus passivo se deve ao tipo de convecção do ar: forçada e natural, respectivamente. As subclasses correspondem as seguintes características:

Figura 2 – Representação Esquemática dos Secadores Solares



Fonte: Adaptado de EKECHUKWUA; NORTON, 1999.

Integral ou direto: apresenta uma única câmara onde são instaladas a placa absorvedora e a(s) bandeja(s) de secagem;

Distribuído ou indireto: apresenta duas câmaras, uma com a placa absorvedora e outra com a(s) bandeja(s) de secagem, sendo a câmara de secagem escurecida, a fim de evitar a entrada dos raios solares na mesma e, consequente, reação do produto com o sol;

Misto: apresenta duas câmaras, uma com a placa absorvedora e outra com a(s) bandeja(s) de secagem, sendo a diferença em relação ao secador distribuído o fato de permitir que os raios solares penetrem em ambas as câmaras.

Atualmente tem sido observado expressivo interesse por parte de pesquisadores no desenvolvimento de projetos e realização de diferentes testes em diversos tipos de secadores solares: secador solar misto de convecção natural para produtos agrícolas com sistema de armazenagem de energia térmica (Silveira, 2016); secador solar misto para bananas com os objetivos de avaliar a influência da variação da carga de secagem e da vazão do escoamento do ar no interior do secador, maximizar a eficiência de secagem e determinar a relação ótima entre esses parâmetros (Oliveira, 2014); secador solar de radiação indireta com fluxo de ar forçado para secagem do pedúnculo de caju avaliando a viabilidade desta alternativa para atender aos pequenos, médios e grandes produtores (Machado e outros, 2011); secador solar indireto aplicado na secagem de banana para avaliar a viabilidade científica e operacional do mesmo (Nunes, Lima e Grilo, 2015); entre outros. Esses autores apresentam uma visão geral de seus projetos e os princípios operacionais dos secadores solares testados. Há, também, autores, como por exemplo Hasan e Langrish (2016) que desenvolveram uma metodologia sustentável para avaliar a performance do ciclo de vida dos secadores solares e Singh e Kumar (2012) que propuseram uma nova abordagem para realizar teste térmico em secadores solares, por meio de curva característica de secagem generalizada.

Teixeira (2016) afirma que a secagem é um processo caro que demanda muita energia do sistema e, normalmente, não é utilizado por pequenos produtores. O uso de secador misto com convecção forçada de ar, movido a energia exclusivamente solar, quebra este paradigma, podendo ser implementado tanto por propriedades que praticam a agricultura de subsistência quanto por empresas agroindustriais, pois apresenta custo zero de energia.

De acordo com Belessiotis e Delyannis (2011) são exemplos de vantagens do uso de secador solar em relação a secagem natural: taxa de secagem elevada, controle científico da secagem possibilitando alcançar o teor de umidade adequada do produto final, não há perda do produto pois este não está sujeito aos fenômenos naturais, necessita de menores áreas de secagem para uma mesma quantidade de produto, menor tempo de secagem, maior produtividade, entre

outros. Belessiotis e Delyannis (2011) enfatizam duas razões principais para a utilização de energia solar na secagem de produtos, sendo a economia de energia e a falta de disponibilidade de fontes de energia convencionais em áreas remotas e rurais.

Silva e Grilo (2012) descrevem, de maneira específica, as características construtivas e de funcionamento de um secador solar. O mesmo é composto por um coletor solar plano, uma câmara de secagem com prateleiras para acomodar o produto a ser seco e uma chaminé para circulação do ar. A escolha dos materiais a serem empregados na confecção do secador está relacionada a avaliação da eficiência, custo e durabilidade dos mesmos. Em geral, a placa absorvedora é confeccionada de chapas metálicas com boa condutividade térmica e, para melhorar ainda mais a sua eficiência, é comum pintá-las de preto fosco, a fim de se proporcionar maiores valores de temperatura.

Como a incidência de radiação solar depende das condições atmosféricas, da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano) (Freitas Neto, 2015), o ideal é que o coletor solar de ar seja posicionado voltado para o norte, a uma inclinação igual a latitude local do lugar em que o mesmo será instalado. Entretanto, com o objetivo de maximizar a eficiência anual, Duffie e Beckman (2006) sugerem a inclinação como sendo a latitude local acrescida de 10°.

O coletor solar e a câmara de secagem são os principais componentes dos secadores solares, sendo o projeto, os materiais de fabricação do coletor, a geometria e pintura de cobertura da placa absorvedora, o ângulo de inclinação e a velocidade do fluxo de ar dentro do coletor os parâmetros determinantes na eficiência térmica do mesmo (López-Vidana, Méndez-Lagunas, Rodríguez-Ramírez, 2013).

3.4 Aplicação de secadores solares

Neste item são abordados alguns estudos sobre secadores solares que podem ratificar determinados aspectos apresentados anteriormente, tais como qualidade e custo do produto secado, possibilidade de independência de energia elétrica em um secador ativo e possibilidade de armazenamento de energia para consumo a noite, com melhora do desempenho do processo de secagem.

Onyegegbu, Morhenne e Norton (1994) simularam um secador integral de secagem passiva para avaliar os efeitos de diferentes condições ambientais de temperatura e umidade do ar e as componentes difusa e direta da radiação solar. Os resultados das simulações indicaram que, em condições ideais, o secador é capaz de secar uma quantidade razoável de cultivar por metro

quadrado, obtendo um teor de umidade seguro, necessário para armazenamento a longo prazo, mesmo em dias nublados.

Ferrari Filho (2011) avaliou os custos totais de secagem, em diferentes métodos e temperaturas do ar de secagem (60, 70, 80°C). O autor concluiu que o custo total da secagem estacionária de grãos de milho por saco de 60kg utilizando GLP é mais que três vezes superior em comparação ao ar natural e mais que dez vezes superior quando comparado a secagem solar.

Um secador solar de grãos de milho, foi projetado, desenvolvido e testado no campo por Mumba (1996). A característica mais relevante neste secador é o uso de células solares fotovoltaicas para alimentar um ventilador de corrente contínua responsável pela circulação do ar dentro do secador. A temperatura do ar de secagem foi controlada para evitar o sobreaquecimento e rachaduras do grão. Neste estudo, concluiu-se que o uso do secador, comparado com o método tradicional de secagem ao sol, foi considerada uma opção viável com muitos benefícios, como um ambiente de secagem protegido, qualidade de produto seco melhorada, higiênico e eficiente.

O INPA - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia desenvolveu e testou um secador solar multi-uso para produtos naturais, de simples construção, sendo o mesmo totalmente independente de energia convencional, funcionando exclusivamente com energia solar. O sistema de ventilação forçada foi acionado por meio de painéis fotovoltaicos, permitindo 100% de autonomia em termos de energia, ou seja, podendo ser utilizado em áreas remotas, distantes da rede elétrica convencional, e a custo energético operacional zero. A secagem atingiu o teor de umidade desejado com o uso do sistema de ventilação forçada, podendo este ser ligado diretamente aos painéis fotovoltaicos ou através do uso de baterias, demonstrando que a questão técnica não representa problema (Moraes-Duzat e outros, 2012).

Silveira (2016) modelou um sistema auxiliar de armazenagem de energia térmica em um secador solar, a fim de utilizá-la à noite, de acordo com a necessidade do processo. Por meio da modelagem realizada foi possível mostrar a melhora do desempenho do secador com a introdução do sistema de armazenamento de energia térmica.

3.5 Segurança em secadores

A segurança operacional em secadores é de fundamental importância para as pessoas, produtos e instalações.

A NFPA - National Fire Protection Association (Associação Nacional de Proteção contra Incêndios, dos EUA) emitiu relatório contendo informações sobre incidentes de explosão em

que estufas, fornos ou secadores estiveram envolvidos. Foi realizada uma análise das explosões ocorridas, mais especificamente em estufas de cura, fornos elétricos a arco e secadores de grãos (Ranganathan e Gillis, 2016). O relatório, preparado pela Fundação de Pesquisa de Proteção contra Incêndios (Fire Protection Research Foundation, a FPRF) em conjunto com a NFPA, foi emitido para ser utilizado pelo comitê técnico que elabora a norma NFPA 86 - padrão que visa minimizar os riscos de explosões e danos causados por fogo em estufas e fornos usados no processamento industrial de materiais (Ranganathan e Gillis, 2016; Industrial Heating, 2016).

A pesquisa objetivava identificar informações-chave, como os tipos de estufas, fornos ou secadores que estavam sofrendo explosões; as causas e consequências das explosões; quais eram os tipos de proteções instaladas nos sistemas que explodiram (e suas eficiências); os impactos das explosões nos funcionários e nas propriedades e dados adicionais para fundamentar o redirecionamento das orientações contidas na NFPA 86 para alívio de explosão. A principal causa identificada para as explosões foi a falha humana, sendo também identificadas outras causas, tais como falhas no sistema de proteção, ausência de sistemas de proteção, riscos imprevistos e projetos de processos pobres em detalhes (Industrial Heating, 2016).

De acordo com os autores do relatório (Industrial Heating, 2016), o principal dado levantado sob a perspectiva do alívio de explosões, é a porcentagem relativamente grande de incidentes em que estufas, fornos e secadores encontravam-se danificados de maneira significativa ou que precisavam ser substituídos, evidenciando que os dispositivos de alívio de explosão eram ineficientes ou que não estavam instalados.

Esta não é uma situação exclusiva deste país. Várias instalações espalhadas pelo mundo não passam por manutenções periódicas e as adaptações no funcionamento dos equipamentos são realizadas sem aprovação técnica. Além disso, muitos operadores não recebem treinamento adequado para operação dos sistemas, sendo muitas vezes realizado de modo intuitivo.

No documento são relatados dois incidentes envolvendo secagem de grãos de milho, sendo: (i) 2009 - Boxholm, IA (EUA): secador de milho - explosão e incêndio, deixando duas pessoas feridas. Causa: não identificada (Nicole, 2009) e (ii) 2014 - Liberal, KS (EUA): secador de milho (planta de etanol) - explosão, sem vítimas. Causa: Explosão de gás natural na câmara de combustão do secador (Sapp, 2014).

Mais recentemente ocorreram outros acidentes, como o de Mankato, MN (EUA) em 04 de abril de 2017, envolvendo incêndio em secador de milho (planta de etanol), sem vítimas (Barchenger, 2017).

O uso de combustíveis inflamáveis em secadores exige uma série de cuidados. Os fatores que podem ocasionar incêndio ou explosão devem ser prevenidos ou minimizados mantendo

adequadamente o equipamento de secagem e operando-o de maneira segura. A instalação deve ser realizada de acordo com as orientações do fabricante, atentando aos detalhes de construção que devem facilitar a limpeza do mesmo a fim de remover partículas de grãos altamente combustíveis do secador. Procedimentos adequados de operação e manutenção devem ser sempre seguidos. Se os controles de operação automática falharem, os controles de emergência devem atuar imediatamente, avisando ao operador de que existe um problema. Este, por sua vez, deve estar treinado para as atividades habituais e para os procedimentos de emergência a serem seguidos (Cooperative Extension Service, 1998).

Em contrapartida, o secador solar não apresenta risco de incêndio, tornando a sua operação mais segura que a dos secadores que utilizam combustíveis inflamáveis.

4 Conclusão

Os secadores solares são uma excelente alternativa para a secagem do milho, pois permitem alcançar a qualidade adequado do produto após a secagem. Assim, a degradação dos grãos é postergada e o desperdício dos mesmos, que pode chegar a 40% da produção, é evitado (Freitas Neto, 2015).

Trata-se de um equipamento de fácil construção, operação e manutenção, com custo acessível a pequenos agricultores, podendo ser instalado em locais remotos onde a energia elétrica ou o acesso a outros combustíveis ainda é restrito.

É um processo sustentável, pois utiliza fonte de energia renovável e limpa, ou seja, sem emissões de gases poluentes, podendo parte desta energia ser armazenada para utilização nos períodos em que a radiação solar não está disponível na quantidade necessária.

Utiliza combustível de custo zero, que não inflama e nem é explosivo, propiciando completa segurança operacional da instalação, nesses termos, quando comparado aos combustíveis convencionais utilizados na secagem.

Finalizando, o uso dos secadores solarem não é restrito apenas a secagem de grãos, podem ser empregados na secagem de diversas culturas. Entretanto, a configuração do secador deve ser adequada ao tipo de alimento e ao tamanho da instalação, uma vez que pode ser instalado em pequena ou larga escala, atendendo desde a produção industrial quanto ao pequeno produtor, assumindo, neste caso, importante papel social de manutenção de milhares de famílias.

5 References

Barchenger, K. (2017). Firefighters Respond To Fire At Winthrop Ethanol Plant. Keyc.

Belessiotis, V. e Delyannis, E. (2011). Solar drying. Solar Energy. 85:1665-1691.

Busatto, L.A. et. Al (2013). Uso de secador solar para secagem de Pinus sp. Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.). 4:176-190.

Cooperative Extension Service (1998). Hazards of Grain Dryer Fires. Biofuels Journal.

Cornejo, F.E.P. (2012). Nogueira, R.I. e Wilberg, V.C. Secagem e desidratação, Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Acesso em 10 de Abril de 2017, em http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000fid5sgie02wyiv80z4s473tokdiw5.html.

Duffie, J.A. e Beckman, W.A. (2006). Solar engineering of thermal processes. 3ª edição, John Wiley & Sons. New Jersey.

Ekechukwua, O.V. e Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion and Management. 40:615-655.

Elias, M.C. (2015). Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos, Labgraos. Acesso em 15 de Abril de 2017, em http://labgraos.com.br/manager/uploads/arquivo/material---prova-1.pdf.

Ferrari Filho, E. (2011). Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento. Tese de Mestrado em Fitotecnia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 95 pp.

Ferreira, A.G. (2004). Avaliação de viabilidade técnica de chaminés solares para a secagem de alimentos. Ph.D. Thesis. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 115 pp.

Ferreira, A.G., Gonçalves, L.M. e Maia, C.B. (2014). Solar drying of a solid waste from steel wire industry. Applied Thermal Engineering. 73:102-108, 2014.

Freitas Neto, F.R. (2015). Estudo de um secador híbrido (solar-elétrico) para desidratação de frutas. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 88 pp.

Hasan, M. e Langrish, T.A.G. (2016). Development of a sustainable methodology for life-cycle performance evaluation of solar dryers. Solar Energy. 135:1-13.

Industrial heating (2016). Relatório da NFPA com foco em explosões em estufas, fornos e secadores, Industrial Heating. Acesso em 15 de Abril de 2017, em http://aquecimentoindustrial.com.br/estufas-relatorio-da-nfpa-com-foco-em-explosoes-de-secadores/.

Lima, R.F.et. al (2014). Qualidade em grãos de milho submetidos à secagem a alta temperatura e armazenados. Conferência Brasileira de Pós-Colheita, Maringá, Brasil.

López-Vidana, E.C., Méndez-Lagunas, L.L. e Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Efficiency of a hybrid solar–gas dryer. Solar Energy. 93:23-31.

Machado, A.V. et. Al (2011). Avaliação de um secador solar sob convecção forçada para a secagem do pedúnculo de caju. Revista Verde. 6:01-07.

Magalhães, P.C. e Durães, F.O.M. (2006). Fisiologia da produção de milho, Embrapa Milho e Sorgo. Acesso em 10 de Abril de 2017, em file:///C:/Users/gmols/Downloads/Circ_76.pdf.

Martins, R.R. et. Al (2002). Secador de grãos com uso de energia solar. Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável. 3:29-35.

Miura, F. et. Al (2015). Alternativas energéticas para secagem de grãos. 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, São Paulo, Brasil.

Moraes-Duzat, R. et. Al (2012). Secador solar multi-uso para beneficiamento de produtos naturais da Amazônia. Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, Brasil.

Mumba, J. (1996). Design and development of a solar grain dryer incorporating photovoltaic powered air circulation. Energy Conversion and Management. 37:615-621.

Nicole, (2009). Iowa grain elevator explosion injured 2. JusticeNewsFlash.com.

Nunes, A.G., Lima, W.S. e Grilo, M.B. (2015). Novas tecnologias: desenvolvimento de um secador solar usado para desidratação de frutas. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Ceará, Brasil.

Oliveira, A.M. (2014). Estudo experimental da secagem de banana utilizando secador solar. Tese de Mestrado em Engenharia de Energia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 101 pp.

Onyegegbu, S.O., Morhenne, J. e Norton, B. (1994). Second law optimization of integral type natural circulation solar energy crop dryers. Energy Conversion and Management. 35:973-983.

Portella, J.A. e Eichelberger, L. (2001). Uso de gás liquefeito de petróleo na secagem estacionária de milho em secador de leito fixo, Embrapa. Acesso em 10 de Abril de 2017, em http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co64.htm.

Ranganathan, S. e Gillis, S. (2016). Oven, Furnace and Dryer Explosion Incidents, NFPA. Acesso em 15 de Abril de 2017, em https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Resources/Research-Foundation/Research-Foundation-reports/Hazardous-materials/RFOvenFurnaceDryerExplosionIncidents.ashx?la=en&hash=22C459669EE1697A68C1B14EC2FA3B6E0BBBC8FD.

Santos, S.F. (2012). Diferentes tipos e tempos de armazenamento do farelo úmido de glúten de milho. Tese de Mestrado em Veterinária. Faculdade de Medicina Veterinária - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 73 pp.

Sapp, M. (2014). Kansas ethanol plant explosion to cost $1 million to repair. Biofuels Digest.

Silva, A.M.V. e Grilo, M.B. (2012). Desenvolvimento experimental de um sistema de secagem solar para oleaginosas usadas na produção de biodiesel. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luiz, Brasil.

Silva, J.S. (2001). Secagem e armazenagem de café - Tecnologias e Custos. 1ª edição, JARD Editora LTDA. Viçosa.

Silva, J.S. (2008). Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. 2ª edição, Aprenda Fácil. Viçosa

Silveira, L.R. (2016). Modelagem de um secador solar de produtos agrícolas com sistema de armazenamento de energia térmica. Ph.D. Thesis. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, Piracicaba. 60 pp.

Singh, S. e Kumar, S. (2012). New approach for thermal testing of solar dryer: Development of generalized drying characteristic curve. Solar Energy. 86:1981-1991.

Teixeira, M.M., Silva, D.F. e Morejon, C.F.M. (2012). Desenvolvimento de um secador solar utilizado na secagem de lodos provenientes de processos de biodigestão. Scientia Agraria Paranaensis. 11:16-21.

Teixeira, S. (2016). Milho - métodos de colheita e secagem, Centro de Produções Técnicas. Acesso em 10 de Abril de 2017, em https://www.cpt.com.br/cursos-agricultura/artigos/milho-metodos-de-colheita-e-secagem.

Weber, E.A. (2005). Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos. 1ª edição, Artliber. São Paulo.

Yassen, T.A. e Al-Kayiem, H.H. (2016). Experimental investigation and evaluation of hybrid solar/thermal dryer combined with supplementary recovery dryer. Solar Energy. 134:284-293.

Authors Profiles:

Gisele Mol da Silva has received a degree in Mechanical Engineering from CEFET-MG (1996). Master's in mechanical engineering from PUC Minas (2009). Doctorate student in Mechanical Engineering by PUC Minas. Specialized in Welding Technology and Engineering by UFMG (2003), specialized in Work Safety Engineering by FUMEC (2001) and specialized in Information System Analysis by FUMEC (1998). She acts as an effective teacher of CEFET-MG in the areas of mechanical destructive and non-destructive tests. She has experience in quality management, quality control, safety at work and environment areas.

André Guimarães Ferreira holds a degree in Mechanical Engineering from the Federal University of Minas Gerais (1997), a master's in mechanical engineering from the Federal University of Minas Gerais (2000) and a PhD in Mechanical Engineering from the Federal University of Minas Gerais (2004). He is a professor at the Department of Materials Engineering at CEFET-MG. She teaches in the Mechatronics Technician course and in the Materials Engineering course. It guides students of the Master in Energy Engineering. He has experience and works in research mainly in the following subjects: solar chimney, numerical simulation and solar and electric dryers.

Cristiana Brasil Maia has a degree in Mechanical Engineering (1997), a master's degree in Mechanical Engineering (2000), and a doctor's degree in Mechanical Engineering (2005), all from Federal University of Minas Gerais. She is currently a professor of Pontifical Catholic University of Minas Gerais (PUC Minas). She has experience in Mechanical Engineering, with emphasis on Thermal and Fluid Systems, working mainly in solar energy, solar chimney, solar drying, wind tunnel and CFD. She has experience and works mainly in solar energy, solar chimney, solar drying, wind tunnel and CFD.

Medición y análisis térmico de un calentador solar de agua

Bonifacio Gaona Ponce
bgaonap@hotmail.com
Universidad Autónoma Chapingo, México

Gilberto de Jesús López Canteñs
alelopez10@hotmail.com
Universidad Autónoma Chapingo, México

Juan Carlos Olguín Rojas
juancarlosuam@hotmail.com
Universidad Autónoma Chapingo, México

Resumen:
En el presente trabajo se midió la temperatura del agua de un calentador solar con capacidad de 150 litros en el termotanque y conformado por 12 tubos de vacío, bajo diferentes condiciones ambientales de la Universidad Autónoma Chapingo. Para ello se colocaron 12 termopares tipo J distribuidos de la siguiente forma: 9 sensores instalados en tres secciones de 3 tubos y 3 en diferentes niveles de altura del termotanque. Se realizó un programa bajo la plataforma de LabView lográndose la toma de datos de los 12 sensores cada 5 minutos. Las lecturas se compararon con la temperatura ambiente, para así determinar un factor de relación entre ambas temperaturas. Se observó que, independientemente de las condiciones climáticas, entre la temperatura ambiente y la del agua contenida en el termotanque del calentador se conserva una relación lineal. En un día nublado, la relación es de 1:2 con respecto al aumento de temperatura ambiente, y en un día soleado, la relación es de 1:3 con respecto al aumento de la temperatura ambiente, en ambos casos se realizó la renovación del agua.

Palabras-clave: Factor de relación, energías renovables, radiación solar.

Abstract:
In the present work, the water temperature of a solar heater with a capacity of 150 liters was measured in the hot water tank and made up of 12 vacuum tubes, under different environmental conditions of the Autonomous University of Chapingo. To do this, 12 J-type thermocouples were installed distributed as follows: 9 sensors installed in three sections of 3 tubes and 3 in different height levels of the hot water tank. A program was carried out under the LabView platform, obtaining the data of the 12 sensors every 5 minutes. The readings were compared with the ambient temperature, in order to determine a factor of relationship between both temperatures. It was observed that, regardless of the climatic conditions, a linear relationship is maintained between the ambient temperature and that of the water contained in the heater tank. On a cloudy day, the ratio is 1:2 with respect to the increase in ambient temperature, and on a sunny day, the ratio is 1:3 with respect to the increase in ambient temperature, in both cases the renovation of the Water.

Keywords: evaluation; access to higher education; access exams; input profile; output profile.

1 Introducción

El Sol irradia en un segundo más energía que la consumida por la humanidad en toda su historia. Una parte de esta energía llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética. La Tierra recibe en el exterior de sus atmosfera una potencia total de 1,73 104 kW. Bajo la perspectiva humana, la fuente de energía solar puede considerarse como inagotable (Duffie y Beckman, 2013).

Actualmente en México es posible hacer uso de la energía eléctrica generada por el uso de paneles fotovoltaicos o sistemas de concentración solar utilizando la radiación directa, y existen mecanismos concretos para lograr que la inversión sea rentable. Considerando la capacidad energética del Sol, la cual perdurará durante millones de años, así como la privilegiada ubicación de México en el globo terráqueo, la cual permite que el territorio nacional destaque en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual con índices que van de los 4.4 kWhm2 por día en la zona centro, a los 6.3 kWhm2 por día en el norte del país, resulta fundamental la adopción de políticas públicas que fomenten el aprovechamiento sustentable de la energía solar en el país (Sener, 2011).

La energía solar es considerada una de las principales fuentes alternativas prometedoras de energía para sustituir la dependencia de otros recursos energéticos fósiles. Los sistemas de calentamiento solar de agua son sistemas muy comunes, que se utiliza ampliamente en muchos países con un alto potencial de radiación solar, como los países mediterráneos (Dagdougui, et al., 2011). A menudo son viables para sustituir los combustibles fósiles utilizados para muchas aplicaciones en el hogar.

En la actualidad, el tubo de vacío de vidrio se ha convertido en el componente clave en la utilización de energía solar térmica, en especial, que se han demostrado ser muy útil en aplicaciones residenciales que requieren temperaturas más altas debido a menor pérdida de calor (Liangdong, et al., 2010).

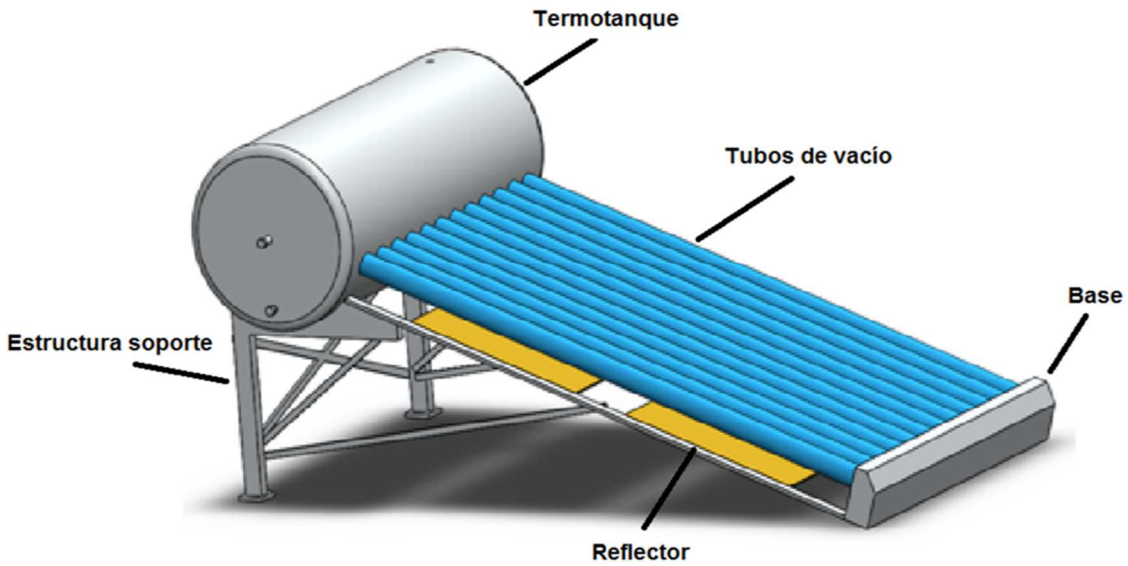
Los calentadores de tubo de vacío tienen un mejor rendimiento que los colectores de placa plana para la operación debido a la reducción de pérdida de calor por convección de alta temperatura debido a la envolvente de vacío alrededor de la superficie del absorbedor (Budihardjo, et al., 2007).

En el presente trabajo, se midió la temperatura del agua dentro de los tubos y del termotanque de un calentador de tubos de vacío, en diferentes días del mes de octubre y noviembre, del que se tomaron cuatro días diferentes condiciones ambientales para determinar un factor de relación de la temperatura.

2 Materiales y Métodos

El sistema de calentador solar se compone de 12 tubos de vacío en paralelo, un termotanque con una capacidad de 150 litros, reflectores de aluminio para dirigir la radiación hacia los tubos, y una estructura que sirve como soporte del calentador solar (Figura 1).

Figura 1. Partes del calentador solar de tubos de vacío.



Para medir la temperatura de los tubos y del termotanque se utilizaron 12 termopares tipo J con una extensión de 6 m, 1 CompactDAQ (compuesto por 3 módulos NI 9211 y 1 chasis USB). Las mediciones se realizaron en el mes de octubre, con un periodo de 10 horas diarias de las 8:00 h a 18:00 h.

Para el análisis térmico del calentador, se midió la temperatura de los tubos de vacío y del termotanque, durante los meses de octubre y parte de noviembre del año 2015, se tomaron cuatro días que mostraron el mismo comportamiento en diferentes condiciones ambientales.

Para procesar los datos de los termopares, se utilizó el software LabVIEW, en el que se realizó la programación de forma gráfica, donde fue fácil visualizar y crear el diagrama para la conexión de los termopares.

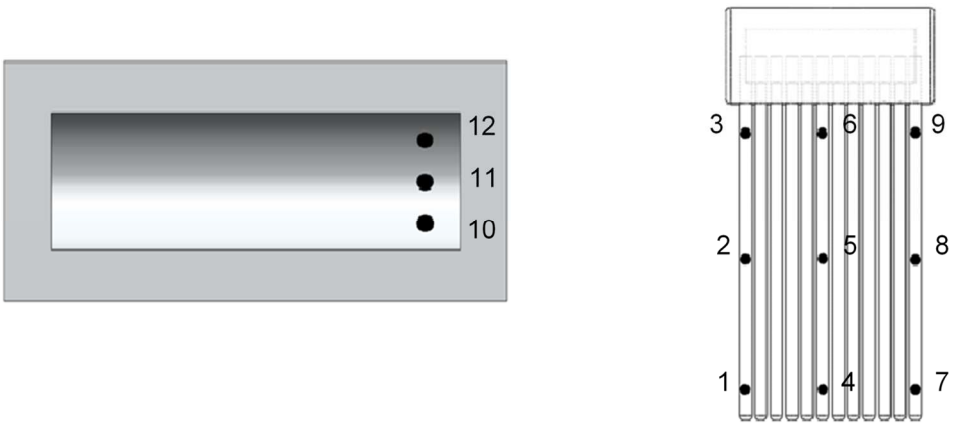
La instalación del sistema se hizo en la azotea del edificio de ingenierías de la Universidad Autónoma Chapingo. Esto para que la radiación del sol llegara de manera directa al calentador

y que no existiera ningún objeto que causara sombra al mismo. Con una orientación de Norte-Sur, el ángulo de inclinación de los tubos es de 20° con respecto a la horizontal.

Una vez terminado el armado del calentador se colocaron los termopares (Figura 2), de tal forma que quedaron distribuidos de forma estratégica para medir el comportamiento de la temperatura durante el día. Se tomó la decisión de medir la temperatura en los tubos de los extremos y en uno del centro con la finalidad de analizar si el viento hacía variar la temperatura.

Figura 2. Ubicación de los sensores en el calentador:
a) Termotanque; b) Tubos de vacío.

(a) **(b)**



Se realizó el llenado del termotanque de manera consecutiva cambiando el agua en las mañanas antes de realizar las mediciones en el periodo comprendido entre los días del 10 de octubre al 4 de noviembre del 2015, iniciando las mediciones las 8:00 h y concluyendo a las 18:00 h todos los días. Después de cada llenado se conectaron los termopares al chasis y este a la computadora portátil para que se realizaran las mediciones correspondientes.

Se utilizó el programa LabVIEW para Windows para leer y almacenar las lecturas de los termopares. El programa tenía un dispositivo para almacenar las lecturas por medio de una plataforma de adquisición de datos (CompactDAQ), la señal del termopar es digitalizada en el módulo y el chasis controla la temporización y la transferencia de datos. El chasis estaba dotado de 8 ranuras para la inserción de los módulos.

La lectura de los datos del calentador se tomaron cada 5 minutos, iniciando a las 8:00 h y terminado a las 18:00 h. Para llevar a cabo las lecturas, se llenó el termotanque con agua a temperatura ambiente, para que al final del día se tuviera la ganancia de energía que se vio reflejada en el aumento de la temperatura.

3 Resultados y Discusión

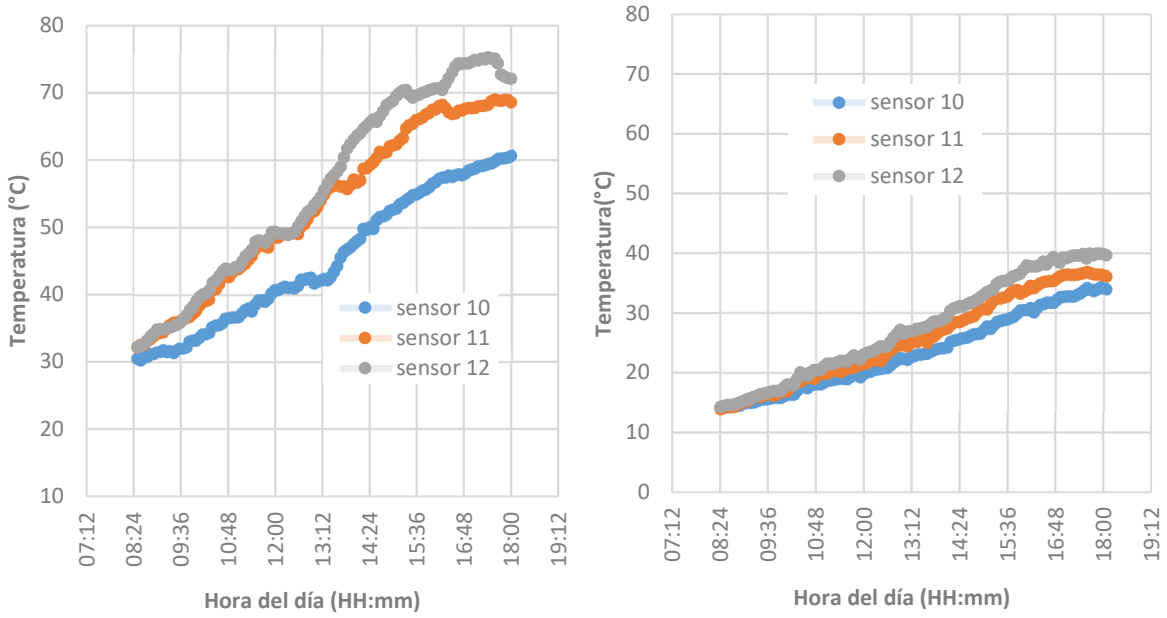
Se obtuvieron las temperaturas dentro de los tubos y del termotanque, se eligieron 2 días nublados y 2 días soleados, en todos los casos renovando el agua del termotanque antes de iniciar las mediciones. Al analizar las temperatura registradas en los sensores instalados en el mismo nivel de altura, aunque en tubos diferentes, se notó que no tenían variación considerable, por lo cual se desechó la idea inicial de que el viento afectaría las medidas de los tubos que estaban en los extremos, de tal forma que para el análisis únicamente fueron tomadas las temperaturas medidas por los sensores 1, 2 y 3.

Con los resultados que se obtuvieron de las temperaturas, se hicieron las gráficas 1 y 2 para observar el comportamiento de éstas y así establecer un factor de correlación.

Las temperaturas medidas por los sensores 10, 11 y 12, instalados en el termotanque, se observan en la gráfica 1, se puede distinguir que existe un comportamiento lineal en todos los casos, tanto en un día típicamente soleado como en un día nublado. Claramente en la parte más baja, medida por el sensor 10, se registran temperaturas más bajas, mientras que en el sensor 12, ubicado en la parte más alta, la temperatura es mayor. Las temperaturas en un día soleado fueron mayores a las registradas en un día nublado.

Gráfica 1. Comparación de las temperaturas medidas en los sensores instalados en el termotanque.

a) Día soleado **b) Día Nublado**



Las temperaturas medidas por los sensores 1, 2 y 3, instalados en un tubo, se observan en la gráfica 2. Se observa el mismo comportamiento lineal, aunque los registros de temperatura son

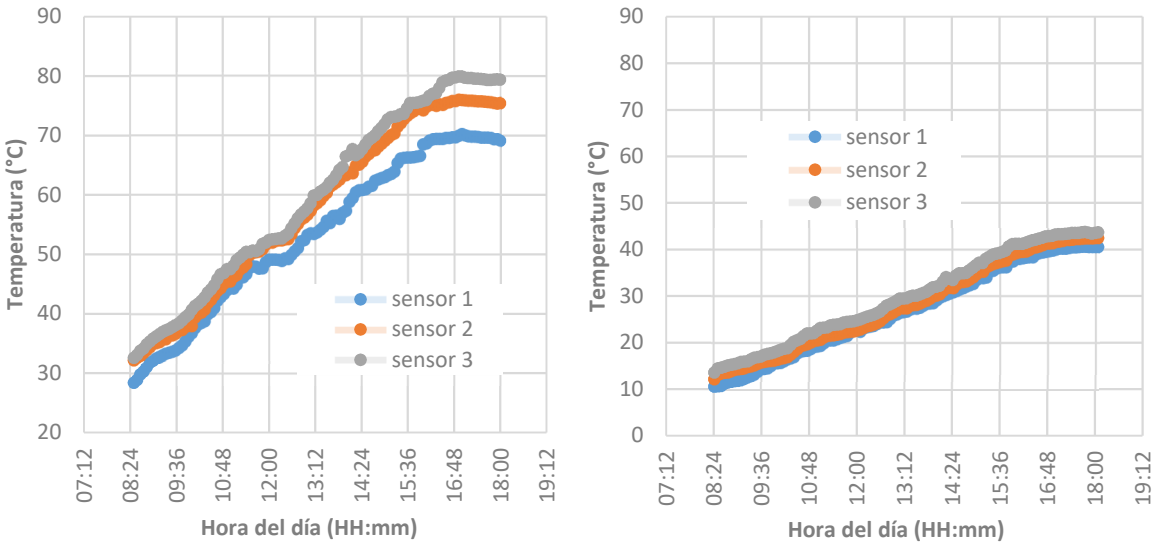
más altos, esto se debe a que los tubos de vacío están más expuestos a la radiación solar. El sensor 3, más cercano al termotanque, registró las más altas temperaturas dentro del tubo, mientras que en el sensor 1, más alejado del tanque y en un nivel de altura más bajo, se registró una temperatura menor. También se nota que las temperaturas en un día soleado, fueron mayores a las registradas en el día nublado.

Para medir la correlación existente entre las temperaturas que se registraron dentro del calentador, tanto en el termotanque como en los tubos, se utilizaron las temperaturas del sensor 3 (instalado en el tubo) y del sensor 12 (instalado en el termotanque) y se compararon con la temperatura ambiente y la radiación solar, los resultados se observan en la gráfica 3.

Los datos de radiación solar y temperatura ambiente fueron proporcionados por la caseta meteorológica del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo.

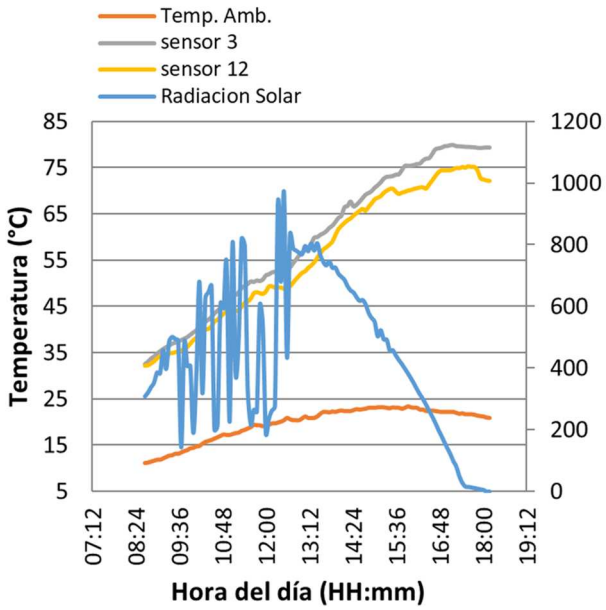
Gráfica 2. Comparación de las temperaturas medidas en los sensores instalados en los tubos.

a) Día soleado **b) Día Nublado**

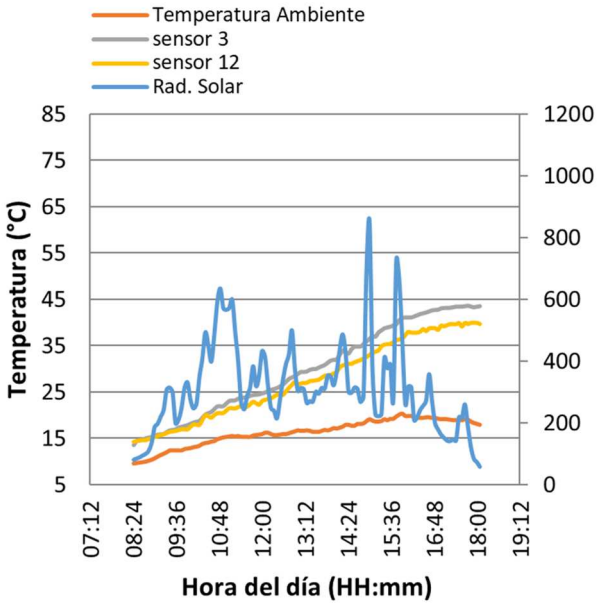


Gráfica 3. Comparación de la radiación solar, temperatura ambiente, temperatura en sensor 3 (en tubo) y temperatura en sensor 12 (en termotanque).

a) Día soleado



b) Día Nublado



Puede notarse en la gráfica 3 que durante un día soleado, con poca presencia de nubes, la temperatura ambiental más alta fue de 23°C, registrada a las 15:30 h, a esa hora la temperatura dentro del termotanque fue de 70°C, mientras que en un día nublado la temperatura más alta registrada fue de 20°C, registrada a las 16:30 h, y a la misma hora la temperatura dentro del termotanque fue de 36°C.

Se estableció que existe un comportamiento lineal desde el inicio de la toma de datos hasta que la temperatura ambiente alcanzó su temperatura máxima, tanto en un día nublado como en uno soleado. Se obtuvo una relación entre el incremento de la temperatura dentro del calentador solar y la temperatura ambiente, quedando como se indica en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Relación entre las temperaturas existentes dentro del calentador solar y la temperatura ambiente en un día soleado.

	Hora	Temperatura ambiente (° C)	Temperatura dentro del tubo (°C)	Temperatura dentro del termotanque (°C)
Inicio	08:40	11	32	32
Final	15:30	23	73	70
Diferencia	07:10	12	41	38
Aumento de temperatura		1	3.4	3.1

Tabla 2. Relación entre las temperaturas existentes dentro del calentador solar y la temperatura ambiente en un día nublado.

	Hora	Temperatura ambiente (° C)	Temperatura dentro del tubo (°C)	Temperatura dentro del termotanque (°C)
Inicio	08:25	9	13	14
Final	16:30	20	40	36
Diferencia	08:05	11	27	22
Aumento de temperatura		1	2.4	2

No se realizaron pruebas en condiciones de temperaturas extremadamente bajas, pero en relación a las pruebas con las que no se renueva el agua del interior del termotanque, se puede notar que el agua que quedaba toda la noche, en las mañanas al inicio de las mediciones la temperatura del agua no presentaba una pérdida de calor considerable, esto debido al buen aislamiento del termotanque y el buen aislante térmico de los tubos de vacío, se podría afirmar que son adecuados para este tipo de climas, lo cual es una ventaja con respecto de los colectores de placa plana que colapsan en estas condiciones. Esta fue la razón por la que se optó por renovar el agua al inicio de cada medición de datos.

4 Conclusiones

Se determinó un factor de relación entre la temperatura ambiente y la temperatura del agua dentro del termotanque. Al realizar el análisis del incremento de temperatura en el calentador, se pudo notar que mientras la temperatura ambiente aumentó 1 °C, la temperatura dentro del termotanque aumentó significativamente, de acuerdo a las diferentes condiciones ambientales

que este se encuentra expuesto el calentador, observándose en un día nublado se tuvo un incremento de 2°C cuando la temperatura ambiente aumentó 1°C y en un día soleado se registró un incremento de 3.1°C cuando la temperatura ambiente aumentó 1°C.

Se puede observar que el incremento de temperatura dentro del tubo es mayor al del termotanque, esto se debe que la cantidad de agua en el tubo es menor en comparación al del termotanque, así también, este tiene un contacto más directo con la radiación solar.

5 References

Budihardjo, I., Morrison, G. L., y Behnia, M. (2007). Natural circulation flow through water-in-glass evacuated tube solar collectors. Solar Energy. Volume 81, Issue 12, pp 1460-1472.

Dagdougui, H., Ouammi, A., Robba, M. and Sacile, R. (2011).Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector: Application to Tetouan (Morocco). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Volume 15, Issue 1, pp 630-638.

Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.

Liangdong, M., Zhen, L., Jili, Z., and Ruobing, L. (2010). Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. *Building and Environment.* Volume 45, Issue 9, pp 1959-1967

SENER. (2011). *Balance nacional de energía 2010.* Secretaria de energía. Dirección General de Planeación Energética. México.

Authors Profiles:

Bonifacio Gaona obtuvo el título de ingeniero mecánico agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo, México, en 1997. Se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Es integrante del área académica en ciencias básicas y el tema de investigación principal es la energía renovable. Actualmente es coordinador académico del diplomado "Las energías alternativas para el desarrollo rural sustentable.

Gilberto de Jesús López obtuvo el grado de doctor en la Universidad Autónoma Chapingo, México, en 2007. Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Es integrante del área académica en ciencias básicas y el tema de investigación principal está relacionado con el campo de la agricultura de precisión.

Juan Carlos Olguín obtuvo el grado de maestría Universidad Nacional Autónoma de México, México, en 2009. Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Es integrante del área académica en ciencias básicas y el tema de investigación principal es control inteligente.

Difração da luz solar aplicada na iluminação de ambientes

José Weverton Oliveira Silva
wevertonsol@hotmail.com
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

Ícaro Kleisson Araújo Lucena
icarosjs@gmail.com
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

José Wilson Oliveira Silva
jwilson_oliveira@hotmail.com
Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil

Synara Lucien de Lima Cavalcanti
synara2004@hotmail.com
Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil

José Ubiragi de Lima Mendes
jwilson_oliveira@hotmail.com
Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil

Resumo:
Este trabalho apresenta um estudo sobre a potencialidade da utilização de sistemas que captem a energia solar, abundante no Brasil e de baixo custo, reduzindo os gastos com eletricidade na iluminação de recintos mediante o seu uso. A pesquisa proposta consiste no desenvolvimento de um protótipo feito de madeira (MDF), simulando um ambiente fechado (corpo negro). Para iluminá-lo foram utilizadas cinco garrafas PETs de 2L, com adição de soluções aquosas compostas por água destilada e hipoclorito de sódio (NaClO), que ao receberem a luz solar, refrataram-na para o interior da câmara fechada, dessa maneira, foi estimada a variação de luminosidade dentro do recinto. Foram coletados dados da luminosidade, intensidade de radiação dentro do sistema, velocidade do vento e as temperaturas interna e externa da câmara. As inclinações adotadas foram de 0°, 22,5° e 45°. O ângulo de 22,5° proporcionou a melhor luminosidade. As concentrações de NaClO utilizadas na solução aquosa foram de 0, 100, 300 e 500 mL, para analisar qual a melhor relação entre a luminosidade e concentração aquosa nos elementos. Verificou-se que a concentração de 100 mL é a mais viável, e a luminosidade média obtida foi de 550 lx.

Palavras-chave: Energia Solar, Garrafas PETs, Luminosidade, Solução Aquosa.

Abstract:
This work presents a study about the potential of the use of systems that capture solar energy, abundant in Brazil and of low cost, reducing the expenses with electricity in the lighting of enclosures through its use. The proposed research consists in the development of a prototype made of wood (MDF), simulating a closed environment (black body). In order to illuminate it, five PET bottles of 2 L were used, with the addition of aqueous solutions composed of distilled water and

sodium hypochlorite (NaClO), which when refracted into the closed chamber, estimated the variation of luminosity within the enclosure. Data were collected on the luminosity, radiation intensity within the system, wind speed and the internal and external temperatures of the chamber. The slopes adopted were 0°, 22.5° and 45°. The 22.5° angle provided the best brightness. The concentrations of NaClO used in the aqueous solution were 0, 100, 300 and 500 mL, to analyze the best relation between luminosity and aqueous concentration in the elements. It was found that the concentration of 100 mL is the most viable, and the average luminosity obtained was 550 lx.

Keywords: Aqueous Solution, Luminosity, PET Bottles, Solar Energy.

1 Introdução

O aumento e a constante necessidade no consumo de energia elétrica, por meio de indústrias, comércios e residências, tornam cada vez mais necessária a busca por meios alternativos de utilização desta energia. Com o período de estiagem enfrentado por várias regiões do país, principalmente a região Nordeste, as hidrelétricas e as termelétricas poderiam ser auxiliadas por outras fontes de energia. Uma alternativa que se mostra bastante eficaz nos dias atuais é a utilização das fontes renováveis, cujo foco principal de pesquisas e investimentos são as energias solar e eólica.

Cada vez mais, pesquisadores estão buscando meios inovadores de gerar e utilizar energia com maior eficiência a um menor custo e menor agressão ao meio ambiente. Com ênfase à questão ambiental, que atinge caráter de imprescindibilidade quando se busca meios de amenizar os efeitos do nefasto aquecimento global, o mundo desenvolvido tem priorizado a utilização dessas energias limpas e renováveis.

A energia solar é ecologicamente correta, limpa, inesgotável e gratuita. Com o uso da energia solar você ajuda a não sobreaquecer o globo terrestre e colabora com o país na economia de divisas e evitar novos apagões (SANTOS, 2008).

Pereira et al. (2006) diz que: “Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2500 kWh/m2) são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m2), França (900-1650 kWh/m2) e Espanha (1200-1850 kWh/m2) [...]”.

Devido à disponibilidade dessa forma de energia, tornam-se bastante viáveis estudos para desenvolver formas cada vez mais eficientes de aproveitar a energia solar. A sua utilização traz benefícios importantes para a sociedade e o meio ambiente com a redução do uso de

combustíveis fósseis, redução de emissões de gases de efeito estufa, desenvolvimento tecnológico, sustentabilidade ambiental, social e econômica (ESPOSITO & FUCHS, 2013).

A luz não tem importância apenas do ponto de vista energético, mas também do fisiológico, pois o olho humano se adapta melhor a luz natural. Somado a isso, a luz artificial, além de não reproduzir as cores com precisão, não tem variação de tons ao longo do dia (CORBELLA & YANNAS, 2003). O que torna atrativo utilizar a iluminação natural quando possível, para dessa forma, criar benefícios econômicos e fisiológicos para os usuários.

O aquecimento de água através da utilização de coletores solares tem representado juntamente com as células fotovoltaicas, conversoras da energia solar em eletricidade, uma das aplicações mais viáveis de utilização, tanto residencial quanto industrial. Uma saída aos recentes aumentos nas tarifas em energia elétrica foi a busca por meios para se reduzir estes custos, em todos os setores, desde as indústrias até as residências.

A utilização de garrafas PETs na construção de equipamentos solares já é observada na prática visando aquecimento solar de água de baixo para uso residencial. Segundo Macedo Neto et al. (2014) o coletor solar difere do painel fotovoltaico porque utiliza a energia solar para aquecer um fluido (em geral a água) e não para gerar eletricidade.

A iluminação natural com uso de garrafas PETs é uma alternativa eficiente e pode ser utilizada na substituição de fontes artificiais de luz de baixa potência, como é o caso das lâmpadas incandescentes de 25 e 100W, em boa parte do período diurno (VETTORAZZI et al., 2009).

A câmara desenvolvida para a simulação dos testes baseou-se em um corpo negro, que segundo Çengel et al. (2012) "é um perfeito emissor e absorvedor de radiação". Dessa forma, foi possível estimar a máxima luminosidade que poderia ser fornecida pelas garrafas PETs. Çengel et al. (2012) diz também que "superfícies revestidas com tinta de pigmento negro se aproximam do comportamento idealizado do corpo negro".

Nesta proposta de projeto, pretende-se caracterizar as principais variáveis associadas à utilização da energia solar na luminosidade de ambientes, através da utilização de garrafas PET, visando aplicação e minoração de custos de utilização, nos âmbitos residencial, comercial e industrial.

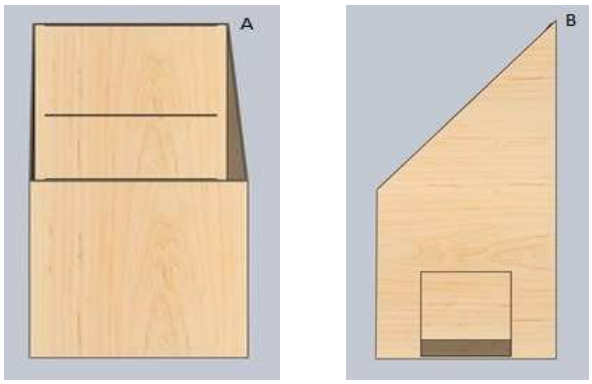
2 Metodologia para obtenção de dados

Foi fabricada uma câmara de *Medium Density Fiberboard* (MDF) com espessura de 9 milímetros, sua parte interna foi pintada com uma tinta de cor preto fosco, na intenção de

aproximar a um corpo negro para simular os ensaios com as garrafas PETs. A dimensão do corpo da câmara foi de 80 x 80 cm de base, e alturas menor e maior de 80 e 160 cm. Foi feita uma porta na lateral do corpo para inserir os equipamentos de medição dos dados, Figura 1.

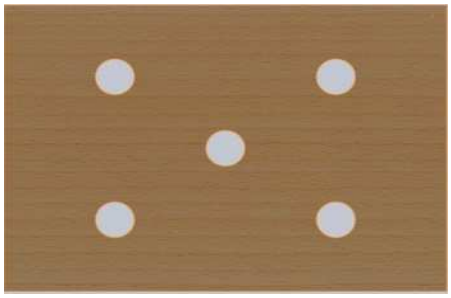
No projeto da tampa, colocaram-se cinco furos equidistantes para obter-se uma melhor distribuição da luminosidade difratada pelas garrafas, Figura 2. Foram fabricadas duas tampas, uma para a inclinação de 45º, e outra para as inclinações de 0º e 22,5º.

Figura 1 - (A) Vista frontal da câmara, (B) Vista lateral da câmara.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 2 – Tampa da câmara feita de MDF.



Fonte: Elaboração própria.

Para obter-se a solução aquosa, destilou-se 35,5 litros de água. O procedimento foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos, localizado no Núcleo de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. O destilador utilizado foi da marca *Biomatic*, Figura 3, com tensão de 220 volts, corrente de 15 A, e potência de 3,5 KW.

Figura 3 – Destilador de água utilizado no experimento.

Fonte: Elaboração própria.

Para realizar o experimento, foram utilizadas 20 garrafas PETs, que foram subdivididas da seguinte maneira:

- 5 garrafas apenas com água destilada (1ª amostra);
- 5 garrafas com água destilada e 100 mL de hipoclorito de sódio (2ª amostra);
- 5 garrafas com água destilada e 300 mL de hipoclorito de sódio (3ª amostra);
- 5 garrafas com água destilada e 500 mL de hipoclorito de sódio (4ª amostra).

Logo após, foram submetidas ao sol, e a partir de então, foi analisada a intensidade da luminosidade interna na câmara que foi produzida por cada configuração adotada.

O experimento foi elaborado ao longo de uma semana no mês de dezembro de 2016, do dia 12 ao dia 16, de segunda a sexta-feira, menos na quinta-feira devido à alta nebulosidade, nos horários entre 9h às 15h, com poucas variações devido às condições climáticas. A câmara foi posicionada de acordo com o movimento aparente do sol, sendo na posição leste pela manhã, e oeste pela tarde.

As medições foram realizadas da seguinte maneira: com a 1ª amostra, foram coletados os dados para cada angulação, 0°, 22,5° e 45°, logo após, as garrafas da 1ª amostra foram retiradas, e em seguida foram colocadas as garrafas da 2ª amostra, realizando-se o mesmo procedimento, e assim sucessivamente para as demais amostras até coletar quatro pontos para cada concentração com suas respectivas angulações ao longo do dia Figura 4.

Figura 4 – Câmara experimental exposta ao sol com as respectivas inclinações de 0º, 22,5º e 45°.

Fonte: Elaboração própria.

Para a coleta dos dados foram utilizados quatro equipamentos: anemômetro digital, sensor de temperatura, sensor de luminosidade e um medidor de energia solar.

Com o anemômetro digital MINIPA - MDA 11, Figura 5, com faixa de medida da velocidade do vento de 0,3m/s até 30m/s, e temperatura com faixa de medida de -20ºC até +60ºC ou -4ºF até +140ºF.

Foram coletados os dados da velocidade do vento e a temperatura do ambiente durante as medições para cada concentração e configuração. Os dados foram colhidos sempre próximos a câmara.

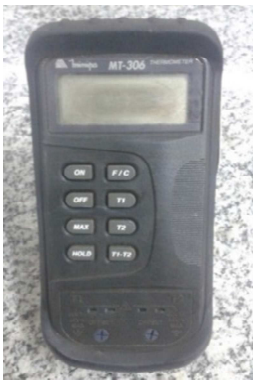
O sensor de temperatura MINIPA MT – 306, Figura 6, com dois termopares K, com resolução de 0.1°C ou 0.1°F, que realiza medidas de temperatura na faixa de -200°C a 1370°C, ou -328°F a 2498°F, foi utilizado para mensurar a temperatura interna da câmara e a temperatura na superfície externa das tampas.

O equipamento realizou simultaneamente as medidas das temperaturas interna (dentro da câmara) e externa (na parte externa das tampas, para obter-se a temperatura superficial).

Figura 5 – Anemômetro digital MINIPA – MDA 11.

Fonte: Elaboração própria.

Figura 6 – Sensor de temperatura MINIPA MT – 306.



Fonte: Elaboração própria.

O medidor de energia solar módulo MES – 100, Figura 7, com precisão de ± 10 W/m² ou ± 3 Btu/(ft² x h) ou ± 5%, foi utilizado para medir a energia solar incidente sobre a câmara, e também a porcentagem de energia que era transferida para o interior da mesma.

Foram coletados cinco dados para cada medição, e a partir dos mesmos foi calculada sua média, já que a energia solar incidente variava constantemente.

Para mensurar a luminosidade interna gerada por cada configuração adotada das garrafas PETs, foi utilizado o luxímetro *PHYWE*. Figura 8 com faixas de medidas de 0 a 300 klx, precisão de ±3%.

O equipamento foi posicionado no ponto médio de cada configuração da seguinte maneira: para a inclinação de 0°, o equipamento foi colocado em uma altura de 40 cm da base, para a

inclinação de 22,5° a altura adotada foi de 55 cm, e para a inclinação de 45°, uma altura de 80 cm. Também foi mensurada a luminosidade externa.

3 Resultados e Discussão

As condições climáticas influenciaram bastante na coleta dos dados, pois as nuvens encobriam o sol, diminuindo a energia solar incidente sobre a câmara, fazendo com que a luminosidade também diminuísse.

Figura 7 – Medidor de energia solar módulo MES – 100.

Fonte: Elaboração própria.

Figura 8 – Luxímetro *PHYWE*.

Fonte: Elaboração própria.

Nas Figuras 9 e 10, observam-se as diversas condições climáticas nas quais o experimento foi realizado, com isso os dados coletados foram mais precisos, pois mostraram os extremos de um dia com condições favoráveis, e outros bastante nublados, o que diminuía a luminosidade dentro da câmara.

Figura 9 – Condições climáticas favoráveis (céu limpo e ensolarado).

Fonte: Elaboração própria.

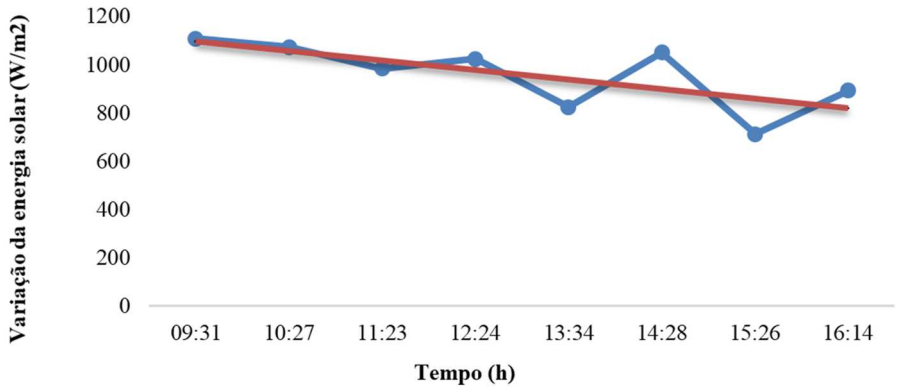
Figura 10 – Condições climáticas não favoráveis (céu nublado).

Fonte: Elaboração própria.

Foi observado o comportamento da luminosidade dentro da câmara para cada concentração, para assim, estimar qual apresentaria o melhor desempenho e a influência que as inclinações causariam nos valores obtidos.

Na Figura 11, observou-se a boa disponibilidade de energia solar, com uma variação em torno de 1000 W/m^2 ao longo dos dias das medições. Os dados abaixo correspondem ao valor médio da energia solar obtida para cada horário à cada horário durante os testes.

Figura 11 – Variação da energia solar ao longo dos dias em que foram feitos os ensaios com a câmara exposta ao sol.



Fonte: Elaboração própria.

A energia solar apresentou decréscimo com o passar do tempo, como pode ser observado na linha vermelha no gráfico, com uma queda mais acentuada depois das 13h14min, apesar das oscilações no gráfico, isso ocorreu pelo fato de que em certos horários do dia havia uma predominância maior de nuvens que encobriam o sol, fazendo com que os valores coletados pelos equipamentos sofressem oscilações, o que pôde ser observado no gráfico.

3.1 Água destilada sem concentração de hipoclorito de sódio: 1.ª amostra

Para verificar se o hipoclorito de sódio exercia algum efeito sobre a iluminação, foi necessário verificar a luminosidade produzida apenas com a água destilada.

Na Tabela 1 observou-se um bom desempenho da água destilada, apresentando valores satisfatórios para todas as inclinações. Os valores correspondem a média geral de cada inclinação apenas para a água destilada ao longo dos dias em que o experimento foi realizado. A inclinação de 45º favoreceu a melhor luminosidade média interna.

Na Figura 12, observou-se a variação da luminosidade ao longo do dia para cada inclinação. Às 09h33min, no início da medição, a inclinação de 45º apresentou um melhor desempenho enquanto que as inclinações de 0° e 22,5° apresentaram pouca variação da luminosidade entre si.

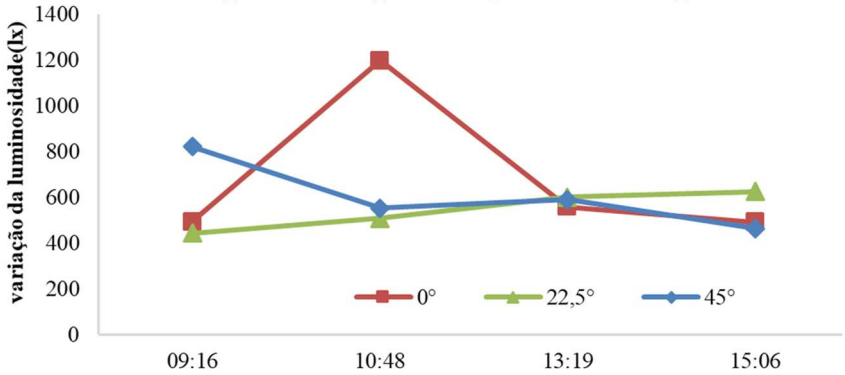
A partir das 11h01min, verificou-se uma mudança no comportamento de cada inclinação, dessa vez, a inclinação de 0° apresentou uma melhor luminosidade interna, enquanto que as inclinações de 22,5° e 45° mantiveram valores próximos de luminosidade.

Tabela 1 – Valores médios obtidos apenas para a água destilada dentro das garrafas PETs.

Valores médios para as inclinações	*Energia solar (W/m²)*	*Luminosidade interna (lx)*
0°	*994*	*640*
22,5°	*949*	*496*
45°	*889*	*715*

Fonte: Elaboração própria.

Figura 12 – Variação média da luminosidade dentro da câmara ao longo dos dias do experimento para a água destilada pura.



Fonte: Elaboração própria.

No terceiro ponto, 14h09min, todas as inclinações tenderam a valores semelhantes em torno de 500 lx. Já no quarto ponto, a inclinação de 22,5° apresentou uma iluminação interna um pouco maior que das demais inclinações.

3.2 Água destilada com 100 mL de concentração de hipoclorito de sódio: 2.ª amostra

Na Tabela 2 foram coletados dados ao longo dos dias de medição para a 2ª amostra, e feita a média de luminosidade interna produzida para cada inclinação.

Pôde-se analisar que a energia solar incidente sobre a câmara com a 2ª amostra foi maior em comparação com a 1ª amostra, Tabela 2. O que correspondeu a uma maior disponibilidade de energia para ser convertida em luminosidade, mas observou-se uma melhoria apenas na inclinação de 0° em relação a 1ª amostra, que correspondeu à de +34,63%. Para as demais inclinações de22,5° e 45°, os valores médios obtidos ficaram um pouco menores em relação

a 1ª amostra, -13,31% e -18,74% respectivamente, com uma variação maior para a inclinação de 45°. Com a 2ª amostra, a melhor luminosidade média interna produzida foi para a inclinação de 0°.

Tabela 2 – Valores médios obtidos para a água destilada com 100 mL de concentração de hipoclorito de sódio

Valores médios para as inclinações	*Energia solar (W/m²)*	*Luminosidade interna (lx)*
0°	*1027*	*979*
22,5°	*966*	*430*
45°	*1008*	*581*

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 13, como também para a concentração anterior, analisou-se a variação da luminosidade ao longo do dia para cada inclinação.

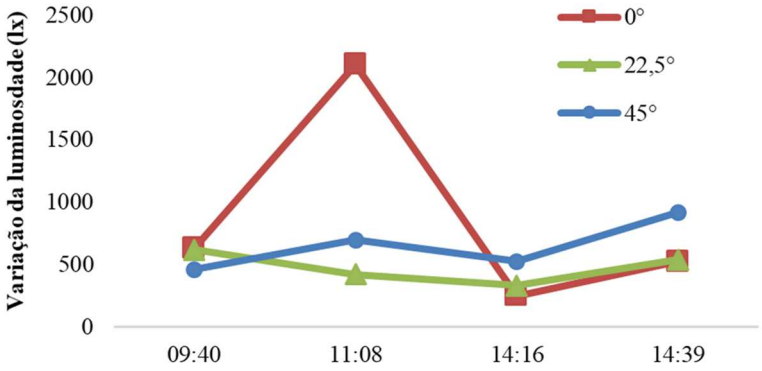
No início da medição às 09h40min, a inclinação de 0º apresentou um desempenho um pouco melhor do que as inclinações de 0° e 45°, mas todas ficaram próximas ao mesmo valor de 500 lx.

Às 11h08min verificou-se um aumento significativo de luminosidade para a inclinação de 0°, enquanto que para 22,5° houve um aumento, mas com uma inclinação menor em relação a de 0°. Já a inclinação de 45° apresentou um decaimento da luminosidade produzida.

A partir das 14h16min houve um decréscimo na luminosidade para todos os ângulos, sendo que o de 0° apresentou valores mais baixos, enquanto que o de 45° manteve a melhor luminosidade interna.

Para a 2ª amostra, a partir das 14h39min a inclinação de 45° teve o melhor desempenho médio de luminosidade ao longo dos dias, enquanto os de 0° e 22,5° apresentaram um ligeiro crescimento, ficando em torno de 500 lx. Apesar de a inclinação de 0° apresentar um pico de luminosidade em torno de 2000 lx, as inclinações de 22,5° e 45° mantiveram valores em torno de 500 lx, o que também é satisfatório.

Figura 13 – Variação média ao longo dos dias do experimento para a água destilada com 100 mL de hipoclorito de sódio.



Fonte: Elaboração própria.

3.3 Água destilada com 300 mL de concentração de hipoclorito de sódio: 3.ª amostra

Na concentração de 300 mL, a energia solar média incidente ao longo dos dias foi menor do que as amostras anteriores para as inclinações de 0° e 22,5°.

Na Tabela 3 a inclinação de 22,5° apresentou uma melhor luminosidade média interna, correspondendo a 756 lx, uma melhoria na iluminação de +43,12% em comparação com a 2ª amostra, e +34,39% em relação a 1ª amostra.

Tabela 3 – Valores médios obtidos para a água destilada com 300 mL de concentração de hipoclorito de sódio.

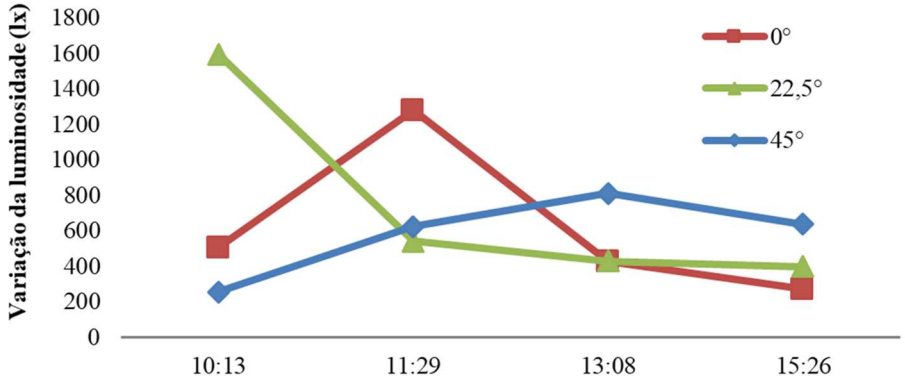
Valores médios para as inclinações	*Energia solar (W/m²)*	*Luminosidade interna (lx)*
0°	*861*	*695*
22,5°	*905*	*756*
45°	*1089*	*529*

Fonte: Elaboração própria.

Para a inclinação de 0°, os valores obtidos com a 3ª amostra foram inferiores aos obtidos para a 2ª amostra, com uma iluminação -29% mais baixa. Em relação a 1ª amostra, houve uma melhoria na luminosidade de +7,91% para a inclinação de 0°. Já para a inclinação de 45°, houve um decréscimo de -8,95% em comparação com a 2ª amostra, e -26,01% em relação a 1ª amostra.

Como nas concentrações anteriores, foi analisada a variação da luminosidade ao longo dos dias de medição para a concentração de 300 mL de NaClO. Figura 14.

Figura 14 – Variação média da luminosidade ao longo dos dias em que o experimento para a água destilada com 300 mL de hipoclorito de sódio.



Fonte: Elaboração própria.

No primeiro ponto, a partir das 10h13min, a inclinação de 22,5° apresentou uma maior luminosidade média em relação as demais inclinações, sendo que a de 45° apresentou o menor desempenho.

De 11h29min o ângulo de 0° teve um melhor desempenho, enquanto que as inclinações de 22,5° e 45° mantiveram valores de luminosidade próximos.

Às 13h08min o ângulo de 45° apresentou uma iluminação maior em comparação aos outros ângulos, que apresentaram valores próximos de 500 lx. Às 15h26min a inclinação de 45° apresentou valores médios melhores, mas com um leve decréscimo, a mesma situação foi observada para as demais inclinações.

3.4 Água destilada com 500 mL de concentração de hipoclorito de sódio: 4.ª amostra

A última configuração analisada foi para 500 mL de NaClO, os valores também foram satisfatórios seguindo a mesma tendência das demais soluções. Na Tabela 4, observou-se que a inclinação de 45° apresentou o melhor valor médio da luminosidade interna durante a semana, que foi de 905 lx.

Tabela 4 – Valores médios obtidos para a água destilada com 500 mL de concentração de hipoclorito de sódio.

Valores médios para as inclinações	*Energia solar (W/m²)*	*Luminosidade interna (lx)*
0°	*774*	*611*
22,5°	*949*	*460*
45°	*1016*	*905*

Fonte: Elaboração própria.

A energia solar média incidente sobre a câmara para o ângulo de 0° foi a menor mensurada. A luminosidade interna produzida foi menor em comparação com as demais concentrações, ficando -12,09% abaixo da concentração da 3ª amostra, -37,59% menor do que a 2ª amostra e -4,53% inferior a luminosidade obtida com a 1ª amostra.

Para o ângulo de 22,5°, a luminosidade produzida só foi maior do que a produzida pela 2ª amostra, onde apresentou uma melhoria de +6,52%. Já em relação as 3ª e 1ª amostras, houve uma redução de -39,15% e -7,26% respectivamente. A energia solar incidente foi semelhante as demais configurações, na faixa dos 900 W/m^2.

Já no ângulo de 45°, a luminosidade média produzida ao longo das medições apresentou o melhor desempenho. Em comparação com as concentrações de 300 mL, 100 mL e água destilada, houve uma melhoria de +41,55%, +35,80% e +21% respectivamente.

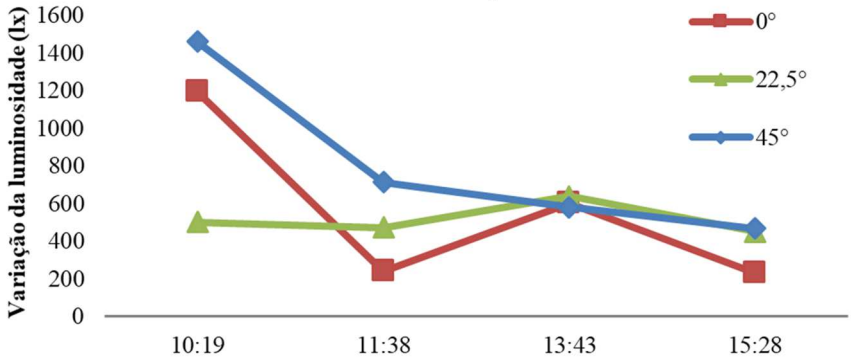
Na Figura 15, às 10h19min as inclinações de 0° e 45° apresentaram valores acima de 1000 lx, enquanto que a inclinação de 22,5° manteve uma luminosidade média em torno de 500 lx.

No segundo ponto, a partir das 11h38min, houve uma diminuição acentuada da luminosidade para as inclinações de 0° e 45°, já para o ângulo de 22,5° manteve-se praticamente constante na parte interna.

De 13h43min todas as inclinações convergiram para um mesmo valor um pouco acima de 500 lx.

E por fim, no quarto ponto, às 15h278min, todos os ângulos apresentaram uma diminuição na luminosidade interna, sendo que o de 0° teve a maior queda, enquanto que os demais ficaram com valores próximos.

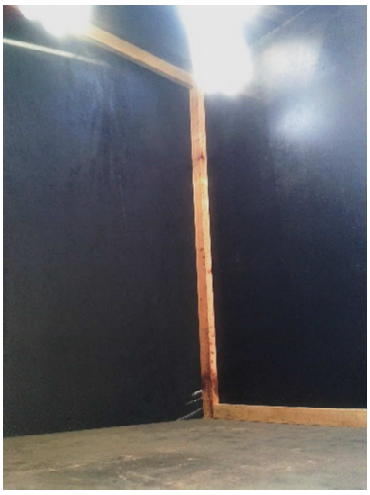
Figura 15 – Variação média ao longo dos dias do experimento para a água destilada com 500 mL de hipoclorito de sódio.



Fonte: Elaboração própria.

A luminosidade interna produzida pelas garrafas PETs com as concentrações das soluções aquosas conseguiu iluminar de forma satisfatória o interior da câmara, mostrando assim a eficácia do sistema. Figura 16.

Figura 16 – Luminosidade interna produzida através das garrafas PETs no interior da câmara.



Fonte: Elaboração própria.

As médias de luminosidades internas obtidas para os ângulos em todas as configurações foram acima de 500 lx. Segundo a norma NBR 5413 para iluminância de interiores, que estabelece as iluminâncias indicadas para vários tipos de atividades, o valor obtido nos experimentos está na classe B, e sua aplicação engloba todos os tipos de trabalhos com requisitos normais de luminosidade para serem executados.

Na Tabela 5, observa-se a variedade de aplicações em que as garrafas PETs podem ser utilizadas para iluminar os ambientes, desde que seja realizado um estudo da quantidade de garrafas necessárias para iluminar os espaços descritos abaixo, contudo a luminosidade produzida atende à demanda média estabelecida para os referidos ambientes, o que torna viável sua utilização para substituir as iluminações artificiais, reduzindo o custo de energia, desde que seja possível fazer a instalação no local.

Tabela 5 – Iluminâncias em lx para vários tipos de atividades em que é viável a utilização de garrafas PETs. Os valores abaixo são os normalizados para essas aplicações de acordo com a NBR 5413.

Tipo de atividade	*Valor mínimo (lx)*	*Valor médio (lx)*	*Valor máximo (lx)*
Auditórios e anfiteatros	*150*	*150*	*150*
Bancos, correios e telégrafos	*200*	*200*	*200*
Barbearias	*300*	*300*	*300*
Bibliotecas	*500*	*500*	*500*
Centrais elétricas	*750*	*750*	*750*
Cervejarias	*300*	*300*	*300*
Corredores e escadas	*750*	*750*	*750*
Escolas	*150*	*150*	*150*
Escritórios	*200*	*200*	*200*
Esportes	*300*	*300*	*300*
Estações ferroviárias e rodoviárias	*300*	*300*	*300*
Estações de tratamento de águas e esgotos	*500*	*500*	*500*
Garagens	*300*	*300*	*300*
Hospitais	*500*	*500*	*500*
Hotéis e restaurantes	*750*	*750*	*750*
Igrejas e templos	*150*	*150*	*150*
Residências	*200*	*200*	*200*

Fonte: Adaptação da NBR 5413.

4 Conclusão

1. Pôde-se observar que sempre nos valores próximos ao meio dia, o ângulo de 0° apresentava picos de luminosidade, o que pode ser explicado devido ao sol estar irradiando, em sua maior parcela, a parte superior da estrutura, dessa maneira essa inclinação favorecia a uma melhor incidência de energia solar, o que gerava valores maiores em comparação aos demais ângulos.

2. Na Figura 15, a luminosidade próxima às 12 horas ficou abaixo das demais, esse fator pode ter sido ocasionado por dias nublados ou até mesmo nuvens encobrirem o sol no horário de coleta dos dados para a inclinação.

3. No período da tarde os valores das inclinações convergiam para valores próximos, normalmente com valores um pouco menores para a inclinação de 0°, isso pode ser observado pelo fato de nesses horários a partir das 14 horas a posição do sol estar mais inclinada, aproximando-se do pôr do sol, o que favorecia as angulações de 22,5º e 45°.

4. Apesar dos bons resultados obtidos com as concentrações de 300 e 500 mL, as garrafas PETs apresentaram vazamentos ao passar de alguns dias, o que pode ter sido ocasionado por alguma reação do hipoclorito de sódio com o material das garrafas, tornando-se impraticável sua utilização.

5. O ângulo que apresentou a melhor luminosidade interna foi o de 0°, e a 2ª amostra foi mais viável do que a 1ª amostra para essa inclinação, porém, como não se aplica a utilização de telhados com inclinação de 0°, devido ao escoamento das águas pluviais, a inclinação de 22,5° torna-se uma boa opção, pois apesar de apresentar uma luminosidade interna um pouco menor do que a inclinação de 45°, manteve uma oscilação menor nos valores da luminosidade interna, como pode ser observado nas Figuras 12, 13, 14 e 15.

6. Portanto, com o estudo realizado, verificou-se que a utilização de garrafas PETs com água destilada e NaClO, é bastante viável para a iluminação de ambientes, devido aos bons níveis de luminosidade que as mesmas conseguem refratar para o interior de ambientes fechados, o que torna sua utilização atrativa, dependendo da demanda do estabelecimento.

5 Agradecimentos

A Pró-Reitoria de pesquisa da UFRN e ao CNPq.

6 References

Santos, R. S. (2008). Conservação de energia: uma ferramenta para analisar o aproveitamento de energia solar em instalações residenciais. São Paulo. Guaratinguetá.

Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L. e Rüther, R. (2006). Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: INPE.

Esposito, A. S. e Fuchs, P. G. (2013). Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil. Revista do BNDES. n° 40. Acesso em 19 de fevereiro de 2017, em https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2431.

Corbella, O. e Yannas, S. (2003). Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos. Revan.

Macedo Neto, M. C., Gomes, I. R. B, Santos Júnior, Z. J., Oliveira, E. V e Souza, L. G. M. (2014). Aplicação de materiais alternativos para o uso da energia solar. Revista Holos. 2014.

Vettorazzi, E., Pizzutti, J. e Stangarlin, H. (2009). Análise do emprego de garrafas PETs para o aproveitamento da luz natural em edificações da cidade de Santa Cruz do Sul – RS. X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Natal, 16 a 18 de setembro de 2009.

Çengel, Y. A. e Ghajar, A. J. (2012). Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática, AMGH.

NBR 5413 (1992). Iluminância de interiores. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

Authors Profiles:

José Weverton Oliveira Silva graduated in Mechanical Engineering from the Federal University of Rio Grande do Norte - UFRN - Brazil. He is currently pursuing a specialization in Wind Energy from CTGÁS-ER – Brazil. He works in the maintenance sector in an Urban Transport company. He is interested in thermal and renewable energies.

Ícaro Kleisson Araújo Lucena is a graduate in Mechanical Engineering from the UFRN – Natal, RN in 2018. Currently, he is dedicated to the selective processes of post-graduation; he is interested in quality control, reliability engineering and industrial maintenance.

José Wilson Oliveira Silva is currently studying Sciences and Technology at the Federal University of Rio Grande do Norte - UFRN - Brazil. He is a technician in labor security by the Federal Institute of Education and Technology of Rio Grande do Norte, Natal - RN. Has interest in renewable energies.

Synara Cavalcanti is Mechanical Engineer, Master and PhD in Mechanical Engineering from the Federal University of Rio Grande do Norte - UFRN - Brazil. Works mainly in the areas of concentration Thermociences/Thermofluids and Materials Technology/Contact Mechanics. Develops researches in the thermal area and researches with main focus on vegetable based lubricants.

José Ubiragi is Mechanical Engineer, Master and PhD in Mechanical Engineering. Currently is professor holder at the Engineering Department of the Federal University of Rio Grande do Norte - UFRN - Brazil. Works in the Thermal and Fluids area, with numerous articles published in congresses and magazines. Has directed several master's and doctoral studies, with published books and several patent applications. Has received awards in university extension work.

Análise térmica do receptor de um refletor Fresnel linear

Patrícia Scalco
patriciascalco1@gmail.com
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil

Jacqueline Biancon Copetti
jcopetti@unisinos.br
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil

Mario Henrique Macagnan
mhmac@unisinos.br
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil

Resumo:
A potência solar concentrada (CSP) consiste basicamente na conversão da irradiância direta normal (DNI) em calor para a produção de eletricidade ou atender processos industriais que operam em temperaturas médias ou altas, acima de 150 ºC. Uma das tecnologias CSP que se mostra competitiva é a de refletores Fresnel lineares (LFR), que utilizam espelhos levemente curvados para concentrar a radiação solar. Os raios solares que incidem nos espelhos são refletidos para o receptor, que é composto de um concentrador secundário contendo os tubos absorvedores por onde circula um fluido de troca térmica. Neste estudo se apresenta a análise de eficiência e perdas térmicas envolvidas em um concentrador secundário, tipo CPC, que possui uma área pequena em comparação a área do campo de espelhos. Um modelo térmico do sistema foi desenvolvido no software EES, considerando o balanço térmico e os processos de convecção, condução e radiação para um sistema concentrador, com um tubo absorvedor e superfície de vidro de fechamento. Observou-se a dependência da radiação incidente, das temperaturas ambiente e do absorvedor e do comprimento do tubo absorvedor no desempenho do sistema. Entre os resultados, verificou-se que a eficiência do sistema pode variar de 80% a 63% para DNI de 1000 a 400 W/m², respectivamente.

Palavras-chave: análise térmica; concentradores CPC; potência solar concentrada; refletor Fresnel linear.

Abstract:
Concentrated solar power (CSP) consists of the conversion of normal direct irradiance (DNI) into heat to meet industrial processes operating in medium or high temperatures, above 150 ºC or for electricity generation. One of the competitive CSP technologies is the linear Fresnel reflectors (LFR), which use slightly curved mirrors to concentrate solar radiation. The solar ray incident on the mirrors are reflected to a static receiver, which is composed of a secondary concentrator containing the absorber tubes through which a heat exchange fluid circulates. This study presents the analysis of efficiency and thermal losses involved in a secondary concentrator, type CPC, which has a small area compared to the mirror field. A thermal model of the system was developed in the EES software, considering the

thermal balance and the processes of convection, conduction and radiation for a concentrator system, with an absorber tube and closing glass surface. The dependence of the incident radiation, the ambient temperatures and the absorber and the length of the absorber tube on the performance of the system was observed. Among the results, it was found that the thermal efficiency of the system could vary from 80% to 63% for DNI from 1000 to 400 W/m², respectively.

Keywords: concentrated solar power; CPC concentrators; linear Fresnel reflector; thermal analysis.

1 Introdução

O desenvolvimento e melhoria das tecnologias de concentração solar (CSP) dependem tanto de estudos geométricos, como térmicos para avaliar o potencial de concentração e o desempenho do sistema. Dentre as tecnologias de concentração solar existentes a de refletores Fresnel lineares (LFR) é considerada como um método prospetivo em aplicações que exijam temperaturas acima de 150 °C, devido à sua estrutura simples e de baixo custo de construção.

Os concentradores do tipo LFR possuem uma vasta aplicação dentro da faixa de temperatura de operação, que vai desde geração de calor para processos industrias até a produção direta de vapor para a geração de eletricidade. Esse tipo de concentrador possui uma concentração linear e é composto pelo campo de espelhos, sistema de rastreamento solar e recetor. O campo de espelhos é responsável por receber os raios solares. Já o sistema de rastreamento tem a função de movimentar os espelhos de acordo com a posição do Sol ao longo do dia. Essa movimentação é comumente feita através de motores de passo sincronizados. O recetor, que recebe a radiação solar, é composto por um ou mais tubos absorvedores e um concentrador secundário. O concentrador secundário consiste em uma segunda superfície reflexiva e tem a função de maximizar a quantidade de raios que incidem no tubo absorvedor influenciando no desempenho térmico do sistema. Pode possuir diferentes geometrias, entre elas as mais comuns são a trapezoidal e a CPC (Compound Parabolic Collector), como mostrado na Fig. 1.

Alguns estudos teóricos e experimentais vêm sendo realizados para analisar o comportamento ótico e o desempenho do sistema para diferentes condições e geometrias de concentrador, como os trabalhos Reynolds et al. (2004), Lin et al. (2013), Pino et al. (2013), Hofer et al. (2015) e Balaji et al. (2016).

Neste estudo, será analisado um recetor com concentrador secundário tipo CPC (Fig. 1), um tubo absorvedor com 50 mm de diâmetro e uma superfície de vidro posicionada na base do

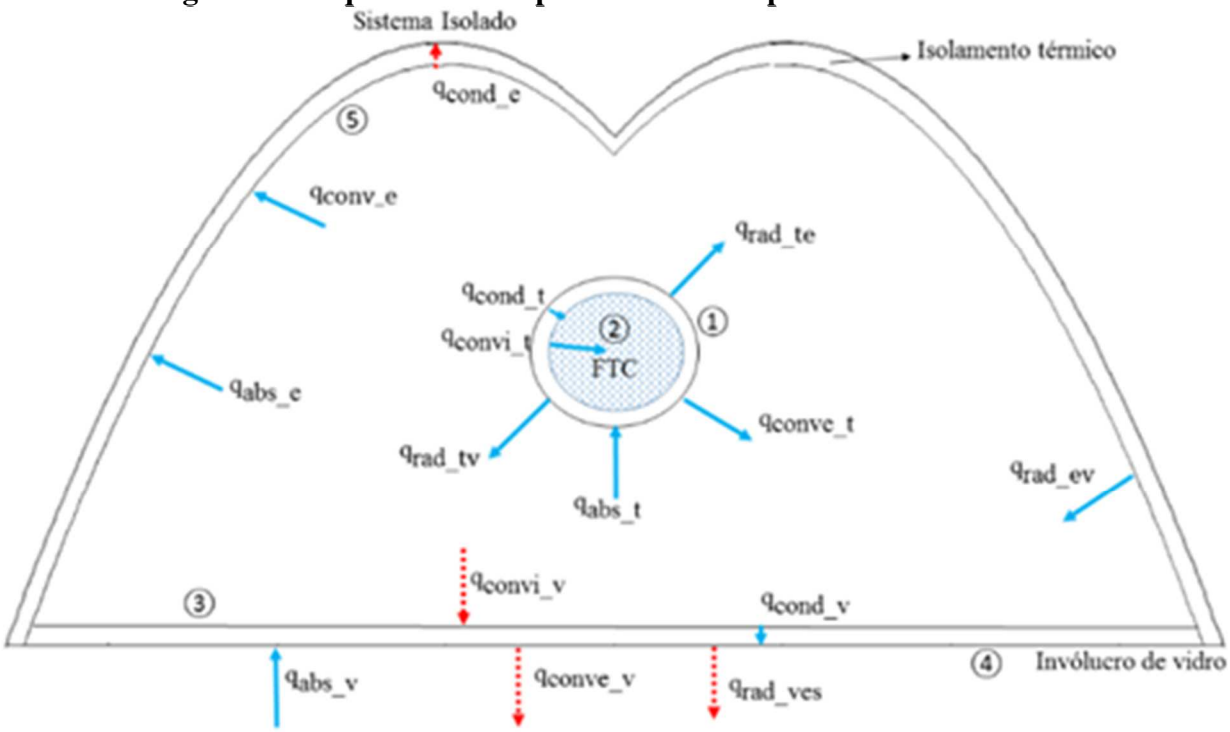
recetor de forma a minimizar as perdas térmicas por convecção. Foi realizado um balanço de energia utilizando um modelo de radiação que considera as três superfícies envolvidas na troca térmica: concentrador secundário + tubo absorvedor + vidro. A utilização deste modelo se deve ao fato de que é necessário avaliar, afim de determinar o desempenho térmico, a radiação emitida por cada uma das superfícies. Assim, serão consideradas as radiosidades e os fatores de forma, relacionando as superfícies geometricamente, independente da temperatura das superfícies e dos materiais que as compõem. O fluido de troca de calor utilizado na simulação é o Therminol VP-1. Foi utilizada como ferramenta de simulação o software EES (Engineering Equation Solver), o qual possui uma biblioteca com as propriedades dos fluidos térmicos.

2 Análise térmica do receptor de um sistema LFR

O desempenho do sistema está ligado à geometria do concentrador secundário, que deve ser projetada visando aproveitar o máximo da radiação disponível. Na análise térmica, considerando todos os fenômenos envolvidos e parâmetros como a vazão e temperatura de entrada de fluido no tubo absorvedor além da emissividade da superfície, é possível avaliar as perdas e quantificar a eficiência térmica.

Conforme o esquema do concentrador CPC da Fig. 1, o balanço térmico neste estudo foi realizado: no tubo absorvedor, na superfície externa (1) e na superfície interna (2); no vidro, na superfície interna (3) e na superfície externa (4); e na cavidade do concentrador secundário (5).

Figura 1 – Esquema do receptor de um LFR para análise térmica.



As setas mostradas no esquema do CPC da Fig. 1 indicam o sentido em que ocorre a transferência de calor e o arranjo foi considerado isolado do meio externo.

No tubo absorvedor (superfícies 1 e 2), o balanço de energia nas superfícies interna e externa, respectivamente, são:

$$q_{cond_t} = q_{convi_t} \tag{1}$$

$$q_{abs_t} = q_{cond_t} + q_{conve_t} + q_{rad_te} + q_{rad_tv} \tag{2}$$

onde q_{cond_t} é a taxa de calor transferida por condução através da parede do tubo absorvedor; q_{convi_t} é a taxa de calor transferida por convecção entre a superfície interna e o fluido de trabalho; q_{abs_t} é a taxa de calor absorvida pelo tubo; q_{conve_t} é a taxa de transferência de calor por convecção entre a superfície externa e ar interno do concentrador; q_{rad_te} é a taxa de calor trocado por radiação da superfície do tubo e da envoltória e q_{rad_tv} é a taxa de calor trocado por radiação entre a superfície do tubo e superfície interna do vidro.

Na placa de vidro do receptor (superfícies 3 e 4), tem-se os seguintes balanços:

$$q_{convi_v} + q_{rad_tv} + q_{rad_ev} = q_{cond_v} \tag{3}$$

$$q_{abs_v} + q_{cond_v} = q_{conve_v} + q_{rad_ves} \tag{4}$$

sendo q_{convi_v} a taxa de calor transferida por convecção entre o ar interno e a superfície interna do vidro; q_{rad_ev} a taxa de calor trocada por radiação entre a superfície da envoltória e a superfície do vidro; q_{cond_v} é a taxa de calor transferida por condução através do vidro; q_{abs_v} é a taxa absorvida pelo vidro; q_{conve_v} é a taxa de calor transferida por convecção entre a superfície externa do vidro e o ar ambiente; q_{rad_ves} é a taxa de calor trocada por radiação entre a superfície externa do vidro e o campo de espelhos.

O balanço de energia na superfície interna da envoltória do concentrador (superfície 5) é dado por:

$$q_{abs_e} + q_{rad_te} + q_{conv_e} = q_{cond_e} + q_{rad_ev} \tag{5}$$

onde q_{abs_e} é a taxa de radiação absorvida pela superfície interna da envoltória; q_{conv_e} é a taxa de calor transferida por convecção do ar interno para superfície interna da envoltória e q_{cond_e} é a taxa de calor conduzida através da parede da envoltória.

As perdas térmicas do sistema consideram as perdas por convecção e radiação para o meio externo e a perda por condução através da parede da envoltória, de acordo com a equação:

$$q_{perdas} = q_{conve_v} + q_{rad_ves} + q_{cond_e} \tag{6}$$

A taxa de calor útil é dada por:

$$q_{útil} = q_{convi_t} = \dot{m}c_p(Te - Ts) \tag{7}$$

onde $\dot{m}$ é a vazão mássica, c_p é o calor específico do fluido de trabalho, T_e e T_s são as temperaturas de entrada e saída do fluido.

2.1 Taxa de radiação incidente e absorvida no receptor

A taxa calor absorvida pelo vidro, q_{abs_v}, é determinada através da radiação incidente na abertura do concentrador secundário, q_{inc}, considerando a eficiência (η_v) e a absortividade do vidro (α_v).

$$q_{abs_v} = q_{inc}\eta_v\alpha_v \tag{8}$$

$$q_{inc} = DNI(A_{espelhos}) \tag{9}$$

$$\eta_v = \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4\varepsilon_5\varepsilon_6\rho_v \tag{10}$$

onde DNI é a irradiância direta normal incidente no campo de espelhos; $A_{espelhos}$ é a área de espelhos; ε são fatores de perda relacionados a: ε_1 sombreamento causado pelos espelhos adjacentes e pelo receptor no campo de espelhos; ε_2 erro de seguimento; ε_3 erro da geometria dos espelhos; ε_4 acúmulo de sujeira no espelho; ε_5 acúmulo de sujeira no vidro na abertura do concentrador; ε_6 outras perdas do sistema, e ρ_v é a refletividade do vidro limpo. Os valores dos fatores de perda são usados de acordo com Forristal (2003): ε_1=0,974, ε_2=0,994, ε_3=0,98, ε_4=1, $\varepsilon_5 = \frac{1+\varepsilon_4}{2}$ e ε_6=0,96.

A taxa de radiação que é absorvida pelo tubo absorvedor, q_{abs_t}, é determinada por:

$$q_{abs_t} = q_{inc}\alpha_t\eta_{fi} \tag{11}$$

onde α_t é a absortividade do tubo (aço inoxidável) e η_{fi} é o fator de interceptação, o qual representa a fração de raios incidentes no receptor que atingem o tubo absorvedor. Na superfície interna do concentrador, a taxa da radiação incidente que é absorvida é dada por:

$$q_{abs_e} = q_{inc}\alpha_e \tag{12}$$

onde α_e é a absortividade da superfície.

2.2 Transferência de calor no receptor

2.2.1 Condução e convecção

Na parede do tubo absorvedor a taxa de transferência de calor por condução é calculada pela equação de Fourier, considerando a transferência de calor por difusão unidimensional, regime estacionário e geometria cilíndrica, assim como na placa de vidro com geometria plana e na parede do concentrador.

O calor transferido para o fluido de trabalho, por convecção, considera a temperatura da superfície interna do tubo e a temperatura média do fluido. O coeficiente de transferência de calor, h_i, foi calculado a partir do número de Nusselt, Nu_i, ou:

$$Nu_i = \frac{h_i D_i}{k_f} \tag{13}$$

sendo D_i o diâmetro interno do tubo e k_f a condutividade térmica do fluido. Para escoamento em regime de transição-turbulento (número de Reynolds, Re, na faixa de 3 x 10^3 a 5 x 10^6), o Nu_i é dado pela correlação de Gnielinski (1976):

$$\begin{cases} Nu_i = \dfrac{\left(f/8\right)(\mathrm{Re}_i - 1000)\,\mathrm{Pr}_i}{1{,}07 + 12{,}7\left(f/8\right)^{1/2}\left(\mathrm{Pr}_i^{2/3} - 1\right)} \\ f = \left(0{,}79\ln\left(\mathrm{Re}_i\right) - 1{,}64\right)^{-2} \end{cases} \tag{14}$$

e para o escoamento laminar, Nu_i= 4,36, considerando a condição de fluxo de calor constante na parede do tubo.

No caso da transferência de calor por convecção entre a superfície externa do tubo e o ar interno no concentrador, foram consideradas a temperatura do ar ambiente dentro da envoltória do concentrador secundário e o processo de convecção natural. Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor, h_e, a equação análoga à Eq. 13, onde o Nu_e depende do número de Rayleight, Ra, e é dado pela correlação de Churchill e Chu (1975).

$$Nu_e = \left\{ 0,6 + 0,387 Ra^{1/6} \Big/ \left[\left(1 + 0,559/Pr\right)^{9/16} \right]^{8/27} \right\}^2 \tag{15}$$

Da mesma forma, se calculou a taxa de calor por convecção entre o ar interno e a superfície interna do concentrador, onde neste caso a área depende do formato que é utilizado, o CPC, e a superfície interna do vidro.

Com relação à superfície externa da placa de vidro e o ambiente externo ao receptor, a taxa de calor transferida por convecção considera a temperatura do ambiente externo e no cálculo do coeficiente de transferência de calor, $h_{v,ar}$, o Nu é dado pela correlação para superfície de placas horizontais (Çengel e Ghajar, 2015).

$$Nu_{amb,e} = 0,27\, Ra^{0,25} \tag{16}$$

Esta correlação se aplica para a faixa de $10^5 \leq Ra \leq 10^{11}$.

2.2.2 Radiação

A taxa de calor por radiação é tratada através da radiosidade, J, que é composta pelas parcelas de radiação emitida, E, por uma superfície e a refletida da irradiação, ρG, conforme Modest (2003):

$$J = E + \rho G \tag{17}$$

A troca de calor também depende da orientação das superfícies entre si, caracterizada pelo fator de forma, F. Os fatores de forma foram calculados da superfície do tubo em relação ao concentrador secundário, do tubo absorvedor em relação ao vidro, do concentrador secundário em relação ao vidro e do vidro em relação ao campo de espelhos. Assim, as taxas de calor trocado por radiação entre a superfície do tubo e a envoltória do concentrador, q_{rad_te}, superfície do tubo e do vidro, q_{rad_tv}, e a superfície da envoltória e do vidro, q_{rad_ev}, são dadas respectivamente por:

$$q_{rad_te} = A_e F_{te} \left(J_t - J_e\right) \tag{18}$$

$$q_{rad_tv} = A_e F_{tv} \left(J_t - J_v\right) \tag{19}$$

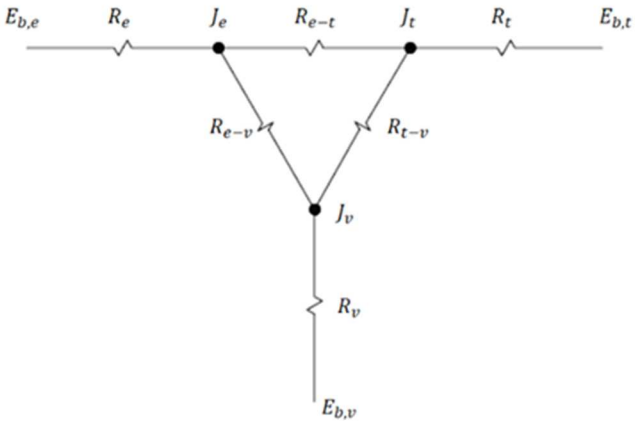
$$q_{rad_ev} = A_{env} F_{ev} \left(J_e - J_v\right) \tag{20}$$

onde os fatores de forma, F_{te}, F_{tv} e F_{ev}, indicam a fração de radiação que deixa a superfície e atinge a segunda superfície (Wong, 1976).

A determinação das radiosidades J_t, J_e e J_v, utiliza a rede de resistências de radiação, conforme mostrado na Fig. 2, considerando as três superfícies: tubo absorvedor (t), envoltória (e) e vidro (v), indicadas na Fig. 1

Em cada um dos nós da rede da Fig. 2, a soma algébrica deve ser igual à zero. E_{b_e}, E_{b_t} e E_{b_v} referem-se aos fluxos emissivos das superfícies da envoltória, do tubo e do vidro, assim como R_e, R_t e R_v as resistências térmicas da superfície à radiação.

Figura 2 – Esquema das superfícies tubo, concentrador secundário e vidro e a rede de radiação associada.



A taxa de transferência de calor por radiação entre a superfície externa do vidro e o campo de espelhos, $q_{rad,ves}$, é a soma das perdas térmicas e deve ser quantificada no estudo dos fenômenos térmicos do sistema, e é dada por:

$$q_{rad_ves} = \sigma \frac{\left(T_{se_v}{}^4 - T_{a_e}{}^4\right)}{\frac{1-\varepsilon_v}{\varepsilon_v A_v} + \frac{1}{A_v F_{v,esp}} + \frac{1-\varepsilon_e}{\varepsilon_e A_{espelhos}}} \tag{21}$$

onde $F_{v,esp}$ é o fator de forma da placa de vidro em relação ao campo de espelhos.

3 Resultados

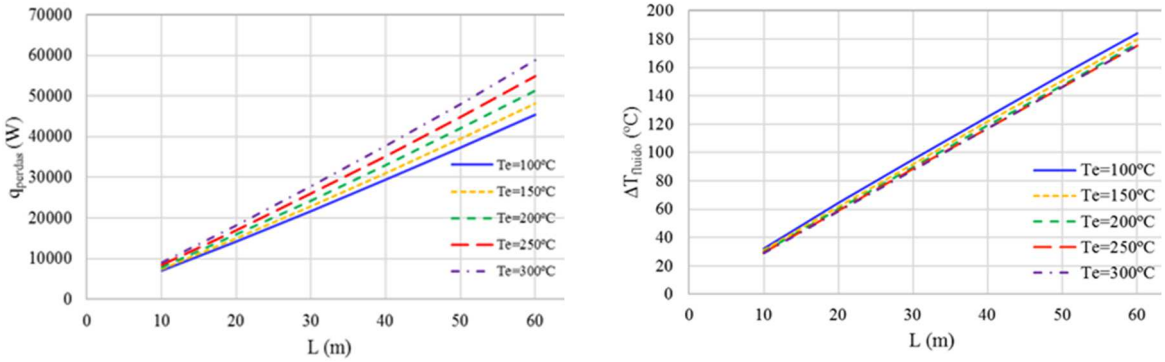
O balanço térmico foi desenvolvido para o receptor com um tubo absorvedor de aço inoxidável de 50 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, posicionado a 90 mm da base do receptor, que contém uma placa de vidro com espessura de 5 mm; concentrador secundário do tipo CPC com isolamento de lã de rocha com espessura de 10 mm. O fator de interceptação

considerado a partir de estudos prévios de simulação foi de 57% (Scalco, 2016 e Scalco *et al.*, 2016). Foram analisadas as perdas térmicas, a variação de temperatura do fluido entre a entrada e a saída do tubo absorvedor e a eficiência térmica, dada por:

$$\eta = \frac{q_{útil}}{q_{inc}} \tag{22}$$

A Fig. 3(a) mostra a taxa de calor perdida em função do comprimento do tubo para as diferentes temperaturas de entrada do fluido no tubo absorvedor, para DNI=1000 W/m² e vazão mássica de fluido de 0,5 kg/s. As perdas correspondem às perdas por convecção e radiação da superfície externa da placa de vidro e a condução através da envoltória do concentrador secundário. Verifica-se que a taxa de calor perdida aumenta com o aumento do comprimento e é maior quanto maior a temperatura de entrada do fluido. A variação de temperatura do fluido também depende do comprimento do tubo, como se vê na Fig. 3(b). Ao aumentar de 10 para 60 m se tem o aumento de 30 a 180 ºC, pois se tem um aumento significativo de área. A influência da temperatura de entrada é menos significativa. Para o maior comprimento do tubo se verifica uma variação de 10 ºC na ΔT_{fluido}, para T_e de 100 e 300 ºC.

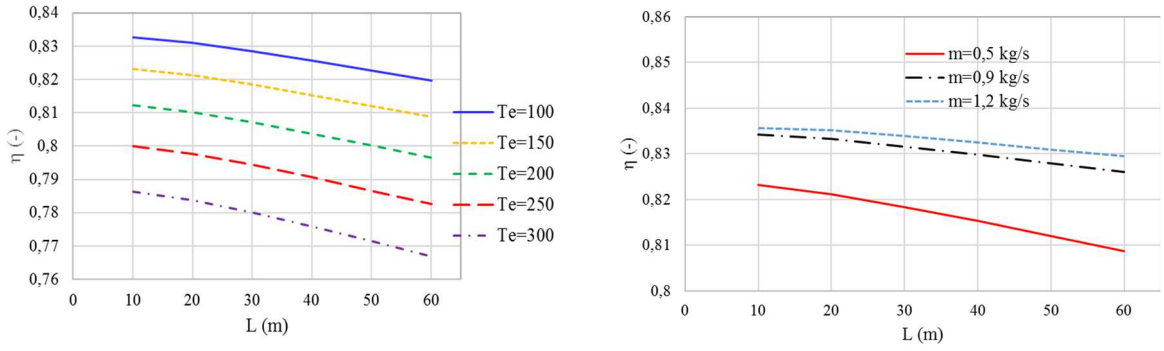
Figura 3. (a) Perdas térmicas e (b) variação de temperatura do fluido com o comprimento de tubo e temperatura de entrada do fluido.



(a) **(b)**

Complementando a análise das perdas térmicas, se verifica na Fig. 4(a) que, conforme as perdas aumentam, a eficiência térmica diminui com o comprimento do tubo e é menor para a maior temperatura de entrada do fluido. A Fig. 4(b) apresenta o efeito da vazão mássica do fluido sobre a eficiência térmica e quanto menor a vazão, menor a eficiência e tendendo a diminuir com o aumento do comprimento do tubo.

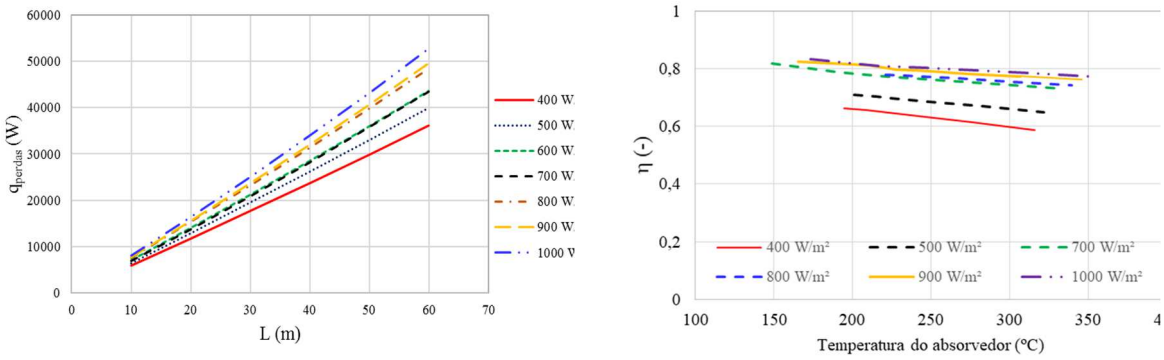
Figura 4. (a) Eficiência térmica em função do comprimento do tubo para diferentes temperaturas de entrada e (b) para diferentes vazões mássicas de fluido.



(a) **(b)**

Na Fig. 5(a) se apresentam as perdas térmicas para diferentes valores de DNI, de 400 a 1000 W/m², temperatura de entrada do fluido de 200 ºC, vazão mássica de 0,5 kg/s e temperatura ambiente de 25 ºC. Como pode ser observado nessa figura, quanto maior a irradiância incidente, mais elevada será a taxa de calor absorvida e, portanto, maiores serão as perdas térmicas e tanto maior quanto maior foi o comprimento do tubo. Para o tubo com 60 m de comprimento, chegou-se a 31,5% de perdas entre 400 e 1000 W/m² de irradiância, que corresponde uma variação na eficiência de 82 a 64%. Na Fig. 5(b) se pode verificar o efeito da temperatura do tubo absorvedor na eficiência, para diferentes valores de DNI, considerando um tubo de 10 m de comprimento e uma vazão mássica de 0,5 kg/s.

Figura 5. (a) Perdas térmicas em função do comprimento do tubo e (b) eficiência térmica em função da temperatura do tubo absorvedor para diferentes irradiâncias.



(a) **(b)**

4 Conclusão

Da análise térmica realizada com um refletor Fresnel linear, com concentrador secundário tipo CPC, um tubo absorvedor de 50 mm de diâmetro, abertura com placa de vidro e fluido térmico Therminol, verificou-se que, quanto maior o comprimento do tubo, maior será a variação de temperatura do fluido entre a entrada e a saída. Da mesma forma, a vazão de fluido afeta as perdas térmicas, diminuindo a eficiência. Para esta configuração de receptor, os valores de eficiência média encontrados chegam a 80% para a melhor condição analisada de DNI=1000 W/m², e na pior condição de 400 W/m² de 63% na média. Dessa forma, é possível observar que para o presente estudo, os refletores Fresnel lineares, além de apresentarem um bom desempenho óptico, possuem uma eficiência elevada, mesmo para épocas do ano em que a incidência de radiação é menor.

5 References

Balaji, S., Reddy, K. S., Sundararajan, T. (2016). Optical modelling and performance analysis of a solar LFR receiver system with parabolic and involute secondary reflectors. *Applied Energy*, **179**: 1138-1151.

Churchill, S. W.; Chu, H.H. S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **18**:1049.

Çengel, Y.A.; Ghajar, A.J. (2015). *Heat and mass transfer: fundamentals & applications,* 5th ed. McGraw-Hill Education, New York, NY.

Forristal, R. (2003). Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver. Golden: National Renewable Energy Laboratory Technical Report.

Gnielinski, V. (1976). New equation for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *International Chemical Engineering*, **16**: 359-368.

Hofer, A.; Cuevas, F. Heimsath, A. Nitz, P. Platzer, W. J.; Scholl, S. (2015). Extended heat loss and temperatures analysis of three linear Fresnel receiver designs. *Energy Procedia*, **69**:424-433.

Lin, M., Sumathy, K., Dai, Y. J., Wang, R. Z., Chen, Y. (2013). Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver. *Applied Thermal Engineering*, **51**: 963-972.

Modest, M. F. (2003). *Radiative heat transfer.* 2ª edição, Burlington: Academic Press.

Pino, F. J.; Caro, R.; Rosa, F.; Guerra, J. (2013). Experimental validation of an optical and thermal model of a linear Fresnel collector system. *Applied Thermal Engineering*, **50**:1463-1471.

Reynolds, D. J., Jance, M. J., Behnia, M., Morrison, G. L. (2004). An experimental and computational study of heat loss characteristics of a trapezoidal cavity absorber. *Solar Energy*, **76**: 229-234.

Scalco, P.; Copetti, J.B.; Macagnan, M.H., Pillot, B. (2016). Comportamento óptico de diferentes tipos de concentradores secundários de um sistema de refletores lineares Fresnel. *IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - Conem*, Fortaleza – Ceará, Brasil.

Scalco, P. (2016). *Análise óptica e térmica do receptor de um sistema de concentradores Fresnel lineares.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo-RS. 89 pp.

Wong, R. L. (1976). *User's manual for CNVUFAC the General Dynamics heat transfer radiation view factor program*. California: Lawrence Livermore National Laboratory Technical report.

Authors Profiles:

Patrícia Scalco is graduated in physics and has received her M.Sc. in Mechanical Engineering at the Unisinos University, Brazil. Her research interest is in solar thermal energy, specifically in solar concentrators for medium temperatures.

Jacqueline B. Copetti is the head of the Thermal Science and Fluid Dynamics Laboratory and associate professor in the Mechanical Engineering Graduate Program at Unisinos University, Brazil. She received her M.Sc. in Mechanical Engineering at the Federal University of Rio Grande do Sul, in 1989 and her Ph.D. in Engineering at the Madrid Polytechnic University, Spain, in 1993. Her research interests involve thermal Engineering, thermal processes, two-phase systems and refrigerating systems.

Mario H. Macagnan is an associate professor in the Mechanical Engineering Graduate Program at Unisinos University, São Leopoldo, Brazil since 1996. He received his M.Sc. in Mechanical Engineering at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) in 1989 and his Ph.D. in Engineering at the Madrid Polytechnic University in 1993. His research interests are focused on solar thermal engineering and refrigeration.

Análise por termografia de módulos termofotovoltaicos

C. A. Figueiredo Ramos
framos@ipg.pt
Instituto Politécnico da Guarda & ISE – Electromechatronic Systems Research Centre

Adérito N. Alcaso
aderitona@ipg.pt
Instituto Politécnico da Guarda & ISE – Electromechatronic Systems Research Centre

A. J. Marques Cardoso
ajmcardoso@ieee.org
Instituto Politécnico da Guarda & ISE – Electromechatronic Systems Research Centre

Resumo:
O coletor solar termofotovoltaico (PVT) é um equipamento que integra um módulo fotovoltaico (PV), de conversão da energia solar em elétrica, e um módulo de conversão térmica (T). Esta tecnologia visa o arrefecimento das células fotovoltaicas, para maior geração de energia elétrica, obtendo-se também energia térmica, tornando-se, assim, num equipamento de cogeração. Este dispositivo pode constituir uma alternativa ao convencional painel fotovoltaico e coletor térmico.
Ao contrário do painel fotovoltaico, onde as células operam normalmente à mesma temperatura, pois a radiação solar por célula é semelhante e as condições de arrefecimento também (ação do vento), no PVT existem temperaturas diferentes devido ao movimento do fluido térmico, logo condições de funcionamento diferentes. Fenómeno similar ocorrerá entre painéis com ligação hidráulica. Assim, a análise térmica dos PVTs permitirá estudar a variação de temperaturas entre células de um painel e entre painéis distintos e concluir sobre as limitações que as ligações hidráulicas dos painéis podem ter no seu comportamento elétrico.
Aqui, a termografia revela-se uma ferramenta ideal de estudo, em tempo real, do funcionamento de PVTs em diferentes condições. A análise por termografia é já usada na avaliação de painéis fotovoltaicos, nomeadamente no respeitante ao seu comportamento térmico e no diagnóstico de pontos quentes, sinalizadores de potenciais defeitos nas células.
Neste estudo, conclui-se que as técnicas usadas no aproveitamento térmico dos PVTs não devem ser idênticas às dos painéis térmicos.

Palavras-chave: Células Fotovoltaicas, Radiação Solar, Coletor Termofotovoltaico, Termografia.

Abstract:
The hybrid photovoltaic-thermal solar collector (PVT) is an equipment that integrates a photovoltaic module (PV), which converts solar energy into electric energy, and a module of thermal conversion (T). This technology aims the photovoltaic cells cooling, thus increasing the generation of electric energy, while also obtaining thermal energy, becoming a cogeneration equipment. This device

can stand as an alternative to the conventional photovoltaic panel and thermal collector.
Unlike the photovoltaic panel, where the cells normally operate at the same temperature, since both the solar radiation per cell and the cooling conditions (wind action) are similar throughout the panel, in the PVT there are different temperatures distributions due to the dynamics of the thermal fluid: consequently, the operation conditions are different. Similar phenomenon will occur between panels with hydraulic connection. Thus, the thermal analysis of the PVTs will not only allow the study of the temperature variation between cells of a panel and between different panels, but it will also lead to conclusions on the limitations that the hydraulic connections of the panels can have in their electrical behaviour.
In this context, thermography is an ideal tool for studying, in real time, the operation of PVT systems under different conditions. The thermographic analysis is already used in the evaluation of photovoltaic panels, namely regarding their thermal behavior and in the diagnosis of hot spots, which indicate potential defects in the cells.
In this study, it is concluded that the techniques used in the thermal exploitation of PVTs should not be identical to those of thermal panels.

Keywords: Photovoltaic Cells, Photovoltaic-Thermal Collector, Solar Radiation, Thermography.

---

1 Introdução

As tecnologias baseadas em fontes renováveis estão a ser cada vez mais a solução para a produção de energia numa via sustentável e amiga do ambiente e entre estes, os sistemas baseados em energia solar têm um grande potencial. A radiação solar pode ser usada para produzir energia térmica direta, resultando no aquecimento de água através de coletores térmicos (CT), e energia elétrica direta usando painéis fotovoltaicos (PV). Enquanto a tecnologia de conversão de radiação solar em calor está mais madura, contribuindo para isso o facto de estar há mais tempo no mercado, o uso dos painéis fotovoltaicos evoluiu mais lentamente, mas tem tido um crescimento elevado nas últimas duas décadas, essencialmente fruto da inovação tecnológica na produção de PVs, das condições de mercado e dos incentivos económicos e políticos de vários países, o que contribui, ao nível do consumidor, para um novo paradigma na geração de eletricidade (Gul et al., 2016), (Câmara et al., 2017). Contudo, a eficiência de conversão do PV é reduzida, em comparação com o CT e sendo um componente eletrónico é afetado negativamente pela elevação da temperatura, o que é uma condição de funcionamento quando está disponível um maior valor da radiação solar, como o que se passa por exemplo no verão. A mitigação do efeito térmico nos sistemas fotovoltaicos pode ser feita

com algumas soluções de arrefecimento, usando simples convecção a ar ou outro fluido, originando o coletor solar híbrido conhecido como coletor termofotovoltaico (designação em inglês de photovoltaic-thermal collector ou simplesmente PVT) (Ramos et al., 2010), (Chow et al., 2012).

O PVT é a integração de dois componentes num só módulo, o componente das células fotovoltaicas e o térmico, cujo objetivo é o de melhorar a eficiência das células solares através do seu arrefecimento por um termofluido, numa operação idêntica à realizada por um coletor solar térmico, extraindo o calor da célula e transformando-o em calor útil.

Assim, esta otimização da tecnologia de conversão solar tem como principal objetivo o arrefecimento das células fotovoltaicas, para uma maior geração de energia elétrica, obtendo-se também daqui uma produção de energia térmica.

Neste contexto (Shuklaa et al., 2017) referem que um coletor PVT pode produzir eletricidade e energia térmica simultaneamente, podendo, assim, ser considerado um equipamento de cogeração.

A tecnologia PVT não é tão comum como a dos coletores térmicos ou como os PVs, mas durante os últimos 20 anos a pesquisa intensificou-se (Makki et al., 2015), dando origem a PVTs com melhores desempenhos.

Alguns fabricantes de PVTs estão a ter algum sucesso e espera-se, num futuro próximo, que estes equipamentos venham a ter um papel significativo nos sistemas de geração elétrica (Dualsun, 2017), (Solimpeks, 2017).

As técnicas in-situ, onde a termografia se insere, são consideradas um meio de diagnóstico que permitem uma caracterização detalhada não só do tipo de materiais usados, como das condições locais (como por exemplo os parâmetros ambientais), mecanismos de degradação (como por exemplo a sujidade, humidade e a fissuração, entre outros) e variações das propriedades do equipamento relacionadas com o seu desempenho, permitindo, assim, reduzir a subjetividade das análises visuais e obter uma avaliação mais precisa.

A termografia, que é um método de análise não destrutivo, é aplicada em diversos campos (Edis et al., 2010), nomeadamente em sistemas de energia térmica (Barreira et al., 2007), e nas diversas áreas de manutenção preventiva e preditiva onde o seu uso para identificar e prever falhas e defeitos é já uma técnica consolidada.

A termografia possibilita a obtenção de uma imagem da distribuição da temperatura superficial aproximada de um corpo, sem que haja um contacto físico com este. Esta técnica bidimensional não mede diretamente a temperatura, mas sim a radiação térmica, na gama do infravermelho do espetro eletromagnético (aproximadamente 0,9 – 14 μm), emitida e refletida

pela superfície do corpo. De acordo com a lei de Planck para um corpo negro todos os objetos emitem radiação infravermelha, sendo esta proporcional às suas temperaturas. A termografia baseia-se no princípio de que todos os corpos com temperaturas acima de 0 ºK emitem radiação, cuja distribuição espetral e intensidade dependem de alguns fatores, como por exemplo das respetivas temperatura absoluta e emissividade.

De entre os métodos de avaliação de módulos solares fotovoltaicos, quer seja antes da sua instalação ou em sistemas já ativos de produção de energia elétrica, a termografia é um método de análise rápido e que tem demonstrado fiabilidade, tornando-se relevante não só para a manutenção preventiva e deteção de problemas que deverão surgir no futuro, mas também para análise da qualidade dos módulos fotovoltaicos.

(Moropoulou et al., 2007) referem que a utilização de uma câmara de infravermelhos é apropriada para a avaliação rápida de gradientes de temperatura em sistemas PV e que não requer uma interrupção da operação do sistema. (Acciani et al., 2010) concluíram que o acompanhamento dos valores da temperatura permite a deteção de anomalias antes que se tornem falhas. (Avdelidis et al., 2004) identificaram não uniformidades térmicas em módulos fotovoltaicos de uma central de produção de energia elétrica, o que resultou na substituição de alguns destes módulos para evitar problemas no desempenho global.

Neste contexto e tendo em conta que sobre a análise por infravermelho em PVTs não existe literatura, o objetivo deste artigo é investigar, através da termografia, a pertinente correlação entre as temperaturas dos componentes PVs dos coletores termofotovoltaicos relativamente ao comportamento elétrico e térmico destes e a deteção de pontos quentes que testemunham a presença de células solares defeituosas.

Os PVTs analisados estão instalados na GIRS-RES: Guarda International Research Station on Renewable Energies (http://www.cise.ubi.pt/index.php?op=res), no campus do Instituto Politécnico da Guarda, que é uma das instalações do CISE - Centro de Investigação em Sistemas Electromecatrónicos (http://www.cise.ubi.pt/) sediado na Universidade da Beira Interior.

2 Configuração experimental

Para a aquisição de imagens dos coletores PVTs foi usada uma câmara de infravermelhos Fluke Ti300, com as especificações principais seguintes: medidas na faixa de temperatura de -20 a 650 ºC, precisão de ± 2 ºC ou 2% (o que for maior) em ambiente com 25 ºC, sensibilidade térmica ≤ 0,05 ºC à temperatura alvo de 30 ºC, e faixa espetral do infravermelho de 7,5 a 14

μm. Para a emissividade considerou-se, para todos os testes realizados, o valor de Ɛ = 0,95, que é o valor aproximado de Ɛ do vidro para as condições verificadas.

Os PVTs estudados, de marca Solimpeks, num total de dez, estão instalados na GIRS-RES e têm uma ligação hidráulica entre si do tipo hibrido série/paralelo (duas filas de cinco módulos cada uma) e do tipo paralelo (arranjo global), como se pode ver na Figura 1.

Figura 1: Instalação dos coletores PVTs

Cada fila de 5 painéis está ligada electricamente em série, podendo as 2 filas serem (manualmente) ligadas em série ou paralelo.

Algumas características elétricas e mecânicas de cada PVT encontram-se na Tabela 1, para Condições de Teste Normalizadas (STC).

Tabela 1: Algumas características do PVT

7	Parâmetro	8	Dados
9	Potência elétrica	10	200 W
11	Tensão	12	36,8 V
13	Intensidade de corrente eléctrica	14	5,43 A
15	Número de células	16	72
17	Tecnologia da célula PV	18	Monocristalino
19	Comprimento/largura/profundidade	20	1801/828/90 mm

A Figura 2 representa a estrutura interna de cada um dos PVTs considerados, onde se pode visualizar não só os componentes PV e Térmico, como também a estrutura de suporte e o isolamento térmico.

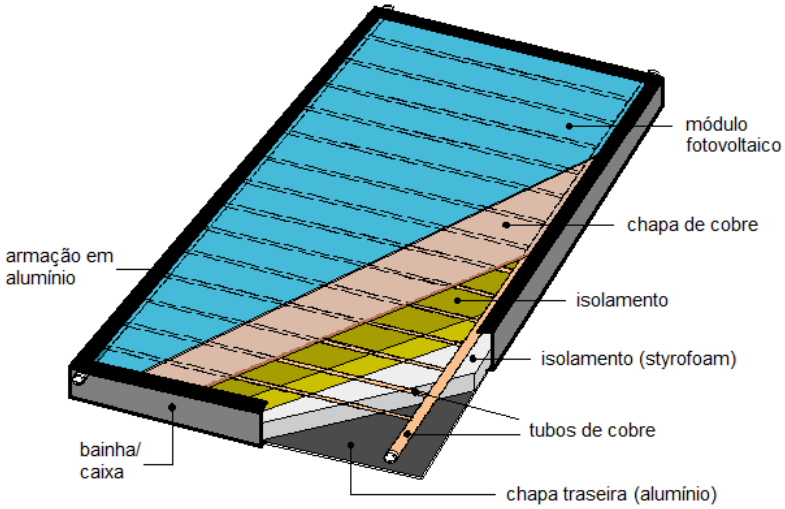
3 Modelo matemático

Para se poder perceber o desempenho dos coletores termofotovoltaicos, neste capítulo procurar-se-á mostrar a sua modelização, útil para realizar a sua simulação, e prever o seu comportamento.

Existem vários estudos sobre modelos numéricos do comportamento dos PVTs (Kumar *et al.,* 2008), (Ramos *et al.,* 2011), (Moscatiello *et al.,* 2017). Relativamente à parte elétrica do PVT, tal como acontece no PV, e dependendo da precisão do modelo, são usados modelos de um ou

dois díodos, mas o primeiro, mais simplificado, é o mais usado (Villalva *et al.,* 2009), daí que tenha sido considerado nos trabalhos em curso com os PVTs. Quanto à parte térmica, o modelo usado é baseado no balanço da transferência de energia entre os diversos componentes do PVT e o ambiente (Chow, 2003).

Figura 2: Estrutura de um PVT



Assim, o modelo elétrico para as células fotovoltaicas deriva da equação geral de díodos, resultando para a intensidade de corrente eléctrica gerada a seguinte equação:

$$I = I_{cc} - I_o\left(e^{\frac{qU}{AKT}} - 1\right) \quad (1)$$

onde Icc é a corrente de curto-circuito, Io é a corrente de saturação inversa do díodo, q é a carga elétrica, A é o fator de idealidade do díodo, K é a constante de Boltzman, T é a temperatura da junção p-n e U a tensão ânodo-cátodo do díodo.

Por outro lado, usando o balanço de energia pode obter-se a seguinte equação:

$$Q_{store,ph} = Q_{ph} + Q_{conv,a-ph} + Q_{rad,e-ph} - Q_e \quad (2)$$

onde $Q_{store,ph}$ é a quantidade de energia térmica armazenada no componente fotovoltaico, Q_{ph} é a energia solar absorvida pelo componente fotovoltaico, $Q_{conv,a-ph}$ é a transferência de energia por convecção entre o componente fotovoltaico e o ar, $Q_{rad,e-ph}$ é a transferência de energia por radiação entre o componente fotovoltaico e o ambiente e Q_e é a energia elétrica produzida pelo componente fotovoltaico. Neste estudo o desenvolvimento numérico do modelo do PVT foi implementado no software Matlab/Simulink e validado de acordo com resultados de (Ramos *et al.,* 2011).

4 Resultados experimentais

Para análise da importância da temperatura no bom funcionamento das células solares e para comparação, apresentar-se-ão valores relativamente a um painel PV, com as mesmas características do componente PV do coletor termofotovoltaico, e valores relativamente ao PVT.

A Figura 3 mostra resultados medidos da evolução diária, de um típico dia de verão em Julho na cidade da Guarda, da temperatura ambiente (Tamb) e da temperatura das células solares (Tcel) relativamente ao painel PV, bem como da velocidade do vento.

A Figura 4 mostra resultados experimentais da relação entre a radiação solar (Ps) e a potência elétrica (Pe) gerada pelas células solares do mesmo painel no mesmo dia da figura citada anteriormente.

Figura 3: Resultados experimentais de temperaturas e velocidade do vento para o PV

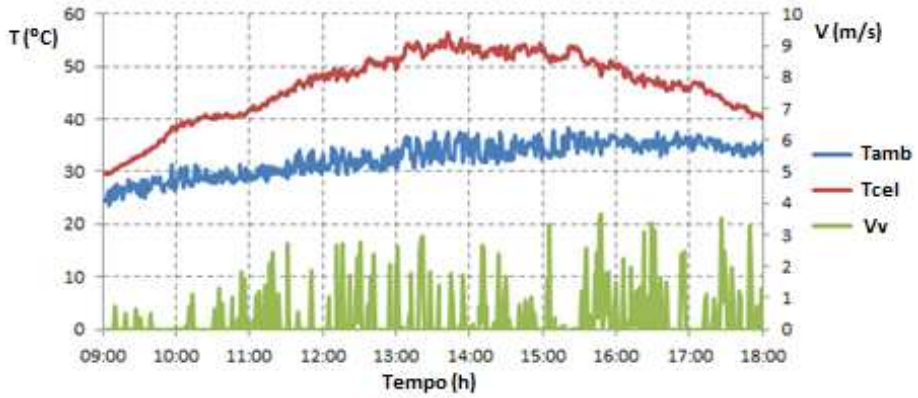
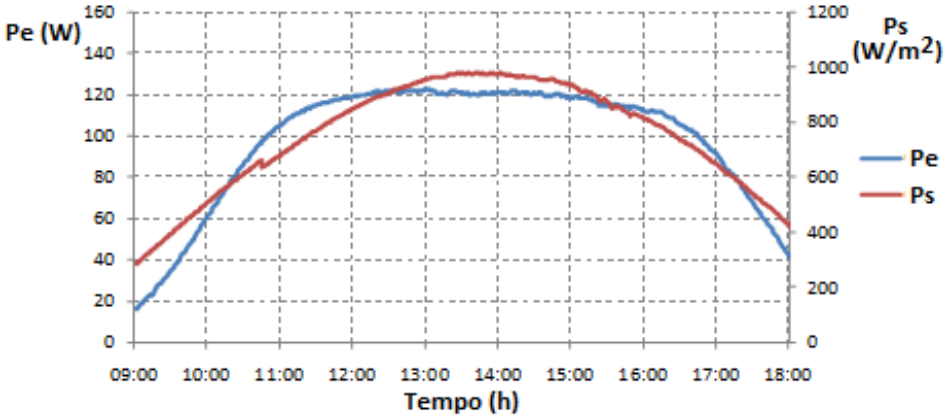
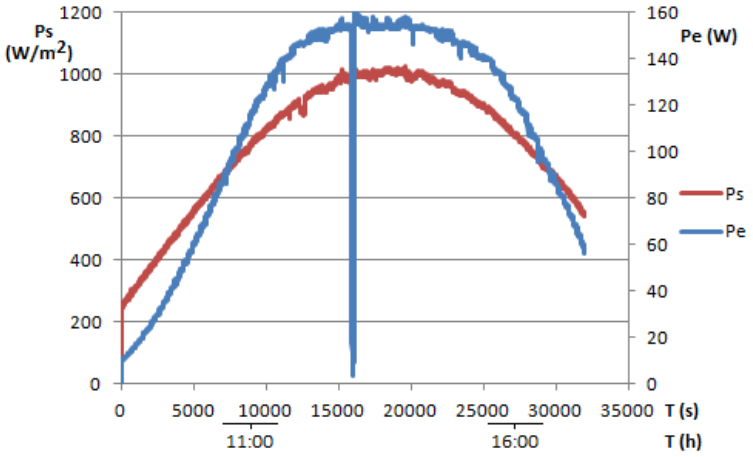


Figura 4: Resultados experimentais da radiação solar (Ps) e potência elétrica (Pe) do PV



A Figura 5 mostra os resultados experimentais da radiação solar e da potência elétrica do componente fotovoltaico do PVT, para um dia típico de verão.

Figura 5: Resultados experimentais da radiação solar (Ps) e potência elétrica (Pe) do PVT



Das Figuras 3 e 4, relativamente ao painel PV, confirma-se o efeito negativo que a temperatura, estritamente ligada à radiação solar, pode ter no comportamento das células solares. Assim, verifica-se que no período das 11:00 às 16:00, intervalo de tempo de maior radiação solar e de maior temperatura nas células solares, não há um acréscimo de potência gerada, bem pelo contrário há uma constância neste parâmetro.

Na Figura 5 e quanto ao PVT, pode-se visualizar, para o mesmo período do dia, que o efeito negativo da temperatura nas células solares é menor pois a curva da potência gerada, Pe, acompanha a tendência da radiação solar. Este facto é devido ao arrefecimento das células solares através do fluido térmico.

5 Análise por termografia dos PVTs

À semelhança de análises feitas em painéis PVs, através de termografia por infravermelhos, (Tsanakas *et al.,* 2009), (Veldman *et al.,* 2011), este trabalho procura proceder à análise de PVTs, usando para isso as mesmas técnicas.

A análise dos PVTs, que estiveram em carga, constou na verificação de regiões de diferentes valores de temperatura através da aquisição de imagens da radiação infravermelha em diversos componentes dos coletores. O conjunto de PVTs instalado no GIRS-RES, cuja latitude é 40º 32’ 0’’ N, está orientado a Sul e têm um ângulo de inclinação em relação ao solo de 35º.

Procurou-se, sempre que possível, adquirir imagens por termografia sem influência do vento, sujidade dos coletores e humidade nas superfícies a analisar, para se reduzir a possibilidade do surgimento de interferências externas na análise térmica. A radiação solar incidente, aquando da obtenção das imagens termográficas, variou de 500 a 800 W/m² e a temperatura ambiente variou de 20 a 25 ºC.

Para entender o comportamento das células solares relativamente ao seu arrefecimento, através do termofluido, procurou-se analisá-las de acordo com o normal funcionamento do sistema global dos PVTs. Assim, de seguida analisar-se-ão as células com o fluido de arrefecimento em repouso e em movimento. Este termofluido está em repouso quando as células não necessitam de ser arrefecidas, entrando em movimento quando as células atingem uma temperatura elevada.

5.1 Análise com termofluido em repouso

As Figuras 6 e 7 apresentam as imagens frontais de dois PVTs, sendo no primeiro caso o PVT de entrada do fluido (é o primeiro da fila) e no segundo caso o PVT de saída do fluido (é o último da fila). Em ambos os casos pode visualizar-se que existe uma estratificação térmica, com um gradiente de temperatura de cerca 4 ºC, verificando-se o maior valor na parte superior do coletor, devido essencialmente ao comportamento termodinâmico do fluido.

Como também se pode ver, desde a entrada do fluido (Figura 6) no sistema de PVTs até à sua saída (Figura 7) não se detetaram alterações significativas nas temperaturas, podendo-se afirmar que a temperatura do fluido na entrada da ligação dos PVTs é aproximadamente igual à temperatura do fluido à saída.

Figura 6: Imagem frontal do primeiro PVT com fluido em repouso

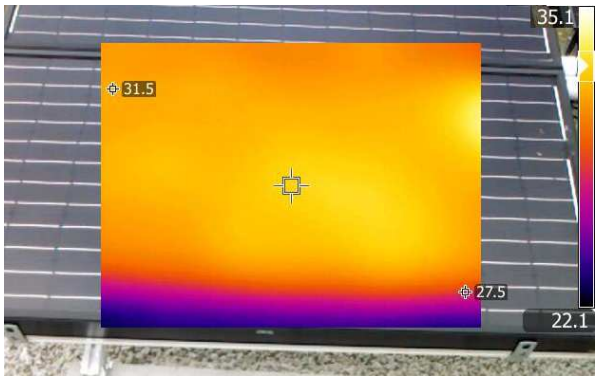
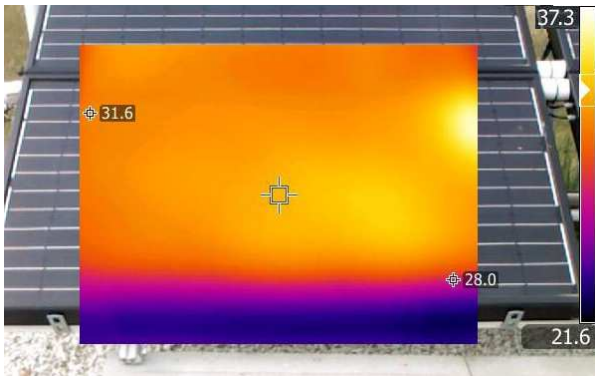


Figura 7: Imagem frontal do último PVT com fluido em repouso



Na Figura 8 pode visualizar-se também a imagem frontal de dois PVTs ligados em paralelo, onde se pode constatar que as temperaturas dos dois coletores são sensivelmente iguais.

Da análise destas figuras pode-se afirmar que as células solares, em cada um dos coletores e à mesma cota, estão aproximadamente à mesma temperatura.

Para comparação, foram obtidas imagens de infravermelhos da parte posterior dos PVTs. Na Figura 9, que mostra a parte posterior de dois PVTs em paralelo, no seu alinhamento vertical, verifica-se que a diferença de temperatura entre estes dois coletores não é significativa, sendo de 0,1 ºC.

Esta situação deve-se ao facto dos coletores estarem bem isolados termicamente nesta zona.

Figura 8: Imagem frontal de dois PVTs

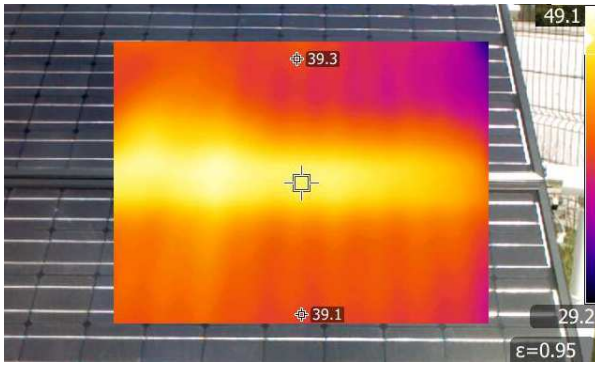
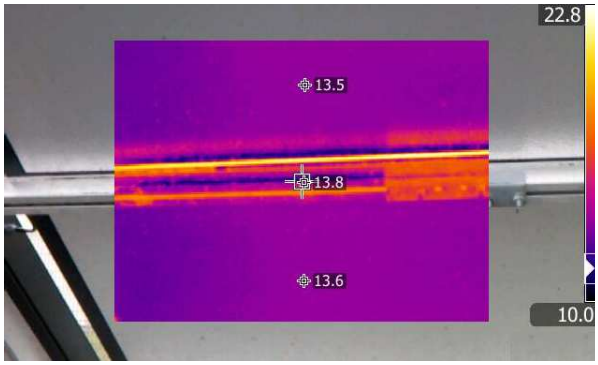


Figura 9: Imagem posterior de dois PVTs



5.2 Análise com termofluido em movimento

As Figuras 10 e 11 mostram as imagens frontais do primeiro e do último painéis do grupo de PVTs, na situação em que o termofluido está em movimento, isto é, o fluido está a arrefecer as células.

Figura 10: Imagem frontal do primeiro PVT com fluido em movimento

Figura 11: Imagem frontal do último PVT com fluido em movimento

Pode-se constatar que não se nota uma estratificação tão acentuada como no caso do fluido em repouso, verificando-se o maior gradiente no coletor de saída e da ordem dos 0,3 ºC. Quanto à comparação das temperaturas entre o primeiro e o último coletor, nota-se um ligeiro acréscimo neste último, embora não muito significativo. Isto deve-se à homogeneização da temperatura no sistema de PVTs pelo movimento do fluido de arrefecimento.

5.3 Pontos quentes

O ponto quente (*hot spot*), na área do solar fotovoltaico, é um aquecimento localizado, na célula ou no módulo, com valores de temperaturas muito superiores à das regiões vizinhas. Este fenómeno pode ser sinónimo de defeitos nas células ou indicar que o módulo poderá estar sob sombreamento (Molenbroek *et al.,* 1991).

Infelizmente, como os pontos quentes são uma realidade em algumas células solares, tentou-se analisar os PVTs sobre esta temática.

A importância da descoberta destes pontos, principalmente numa fase inicial, é primordial para a prevenção da "saúde" das células de modo que não aconteça uma queda na produção de energia global e, ao mesmo tempo, que as células não aqueçam demasiado para não afetarem a produção das células vizinhas (Mayekar *et al.,* 2016).

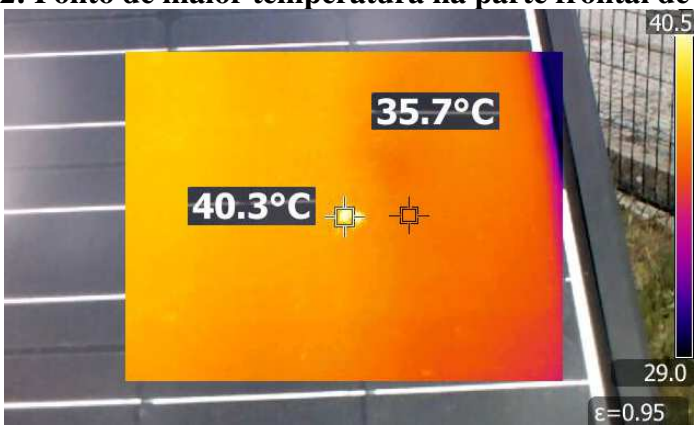
Um ponto quente pode provocar um estrago irreversível da célula solar e do próprio módulo fotovoltaico (Munoz *et al.,* 2011), (Solheim *et al.,* 2013).

A Figura 12 apresenta a diferença de temperatura entre dois pontos do mesmo PVT, sensivelmente à mesma cota, traduzindo-se este gradiente de temperatura ligeiramente acima de 4,5 ºC.

O ponto cuja temperatura é de 35,7 ºC representa aproximadamente toda a área das células do PVT enquanto o ponto com o valor de temperatura de 40,3 ºC pode ser confundido com um ponto quente, mas na verdade era sujidade no vidro, mais concretamente um dejeto de pássaro.

Nesta medida o fluido estava em movimento evidenciando que o arrefecimento proporcionado pelo mesmo fluido não eliminava este "ponto quente".

Figura 12: Ponto de maior temperatura na parte frontal de um PVT



Esta situação, a manter-se, pode causar um sobreaquecimento naquela zona o que pode originar, ao longo do tempo, uma falha nas células, tal como acontece aquando da existência de pontos quentes.

6 Conclusões

Foram analisados um conjunto de dez painéis termofotovoltaicos. Após a sua caraterização elétrica e térmica, mostrou-se a necessidade de arrefecimento das células solares para um melhor desempenho, quando sujeitas à radiação solar. Constatou-se que as células apresentam temperaturas semelhantes num mesmo PVT, apresentando, entre PVTs ligados em paralelo, maiores valores de temperatura no coletor de cima.

Constatou-se, na comparação de imagens por termografia obtidas nas faces frontal e posterior dos PVTs, que as temperaturas não se relacionam, devido ao isolamento posterior do PVT, contrariamente ao que acontece numa análise semelhante a PVs independentemente instalados.

Relativamente a pontos quentes que ocorrem em células solares, provavelmente devido às características individuais da própria célula, não se detetaram em nenhum dos módulos fotovoltaicos dos PVTs. Verificou-se a existência de sujidade pontual em alguns módulos fotovoltaicos, nomeadamente de dejetos de pássaros, que podem ser confundidos, em termos de análise infravermelha, com pontos quentes. Esta situação verifica-se qualquer que seja o valor da radiação solar. De facto, a manter-se ao longo do tempo no módulo, este tipo de sujidade pode vir a danificar a célula devido essencialmente ao seu sobreaquecimento pontual (daí a necessidade de limpeza regular de sistemas PV).

A utilização da análise termográfica com base na diferença de temperatura entre células e entre diversas zonas dos PVTs, pode evitar eventuais problemas, devido à técnica de medição.

Dos resultados obtidos pode concluir-se que atendendo a que quando se usam sistemas PVs se procura maximizar a potência elétrica extraída (MPPT), o mesmo se deve procurar num PVT, embora neste existam efeitos de estratificação térmica associados ao movimento, ou não, do fluido. Este fator deve ser tido em conta no desenvolvimento de um MPPT para os PVTs, nas suas componentes elétrica e térmica.

Agradecimentos

Este trabalho foi suportado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do Projeto UID/EEA/04131/2013.

Referências

Acciani, G., Simione, G. B., Vergura, S. (2010). Thermographic analysis of photovoltaic panels. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Granada, Spain.

Avdelidis, N. P., Moropoulou, A. (2004). Applications of infrared thermography for the investigation of historic Structures. *Journal of Cultural Heritage*. **5**: 119-127.

Barreira, E., Freitas, V. (2007). Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials*. **21**: 218-224.

Câmara, L., Pereira, G. I., Dantas, G., Castro,N., Silva, P. P. (2017). Evolution of solar photovoltaic support policies in Brazil and Portugal: a review. *3rd International Conference on Energy of Sustainability*. Funchal, Portugal.

Chow, T. T. (2003). Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*. **75**: 143-152.

Chow, T. T., Tiwari, G. N., Menezo, C. (2012). Hybrid Solar: A Review on Photovoltaic and Thermal Power Integration. *International Journal of Photoenergy*. Vol. 2012: article ID 307287.

Dualsun (2017). Acedido em 07 de Maio de 2017, em: https://dualsun.fr/en/product/2-in-1-solar/.

Edis, E., Brito, J. de, Flores-Colen, I. (2010). *Diagnosis of exterior wall failures by in-situ inspection techniques – Inspection of facades with adhered ceramic cladding*. Edições IST, Lisboa, Portugal.

Gul, M., Kotak, Y., Muneer, T. (2016). Review on recent trend of solar photovoltaic technology. *Energy Exploration & Exploitation Journal*. Vol. 34(4): 485–526.

Kumar, S., Tiwari, G. N. (2008). An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T) – active solar still. *Int J Energy Res*. **32**: 847-858.

Makki, A., Omer,S., Sabir, H. (2015). Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 41: 658-684.

Mayekar, P., Kotmire, N. J., Wagh, M., Shinde, N. (2016). Review on the thermographic analysis of PV panels/system using the infrared thermal cameras. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*. Vol. 2.

Molenbroek, E., Waddington,D. W., Emery, K. A. (1991). Hot spot susceptibility and testing of PV modules. *The Conference Record of the Twenty-Second IEEE Photovoltaic Specialists Conference,* pp. 547–552.

Moropoulou, A., Palyvos, J., Karoglou, M., Panagopoulos, V. (2007). Using IR thermography for photovoltaic array performance assessment. *4th International Conference of NDT*, Chania, Crete, Greece.

Moscatiello, C., Boccaletti, C., Alcaso, A. N., Figueiredo Ramos, C. A., Marques Cardoso, A. J. (2017). Performance evaluation of a hybrid thermal-photovoltaic panel. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 53, **5**: 5753-5759.

Munoz, M. A., Alonso-García, M. C., Vela, N., Chenlo, F. (2011). Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions. *Sol. Energy*. Vol. 85. **9**: 2264–2274.

Ramos, C. A. F., Cardoso, A. J. M., Alcaso, A. N. (2010). Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors: A Review. *Emerg. Trends Technol. Innov*., Vol. 314, pp. 477-484.

Ramos, C. A. F., Cardoso, A. J. M., Alcaso, A. N. (2011). Modeling and simulation of a hybrid photovoltaic/thermal collector. *International Renewable Energy Congress*, Vol. 1, pp. 455-460.

Shuklaa, A., Kanta, K., Sharmaa, A., Biwoleb, P. H. (2017). Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review. *Solar Energy Materials & Solar Cells Journal*. Vol. 160: 275–286.

Solheim, H. J., Fjær, H. G., E. A. Sørheim, E. A., Foss, S. E. (2013). Measurement and Simulation of Hot Spots in Solar Cells. *Energy Procedia*. Vol. 38: 183–189.

Solimpeks, Solar Energy Corp. (2017). Acedido em 07 de Maio de 2017, em: http://www.solimpeks.com/product/volther, powervolt/.

Tsanakas, J.A., Botsaris, P.N. (2009). Non-destructive in situ evaluation of a PV module performance using infrared thermography. *6th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies*. Dublin, Republic of Ireland, pp. 23-25.

Veldman, D., Bennett, I. J., Brockholz, B., Jong, P. C. (2011). Non-destructive testing of crystalline silicon photovoltaic back-contact modules. *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Seattle, USA, pp. 19-24.

Villalva, M. G., Gazoli, J. R., Ruppert, F. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 25. **5**: 1198-1208.

Authors Profiles:

C. A. Figueiredo Ramos received the Mechanical Engineering diploma (1988) and the MSc degree (1996) in Industrial Engineering from the University of Coimbra, Coimbra, Portugal. He is currently working towards the PhD degree in Industrial Engineering and Management at the University of Beira Interior, Covilhã, Portugal. He is a professor at the Polytechnic of Guarda, Guarda, Portugal. His research interests include renewable energies and energy systems.

Adérito N. Alcaso received the Electrical and Computer Engineering diploma (1990) from the Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal and the MSc degree in Systems and Automation (1995) and the Dr. Eng. degree in Electrical Engineering (2005) from the University of Coimbra,

Coimbra, Portugal. Since 1991, he has been with the School of Technology and Management of the Polytechnic of Guarda, Guarda, Portugal, where he is currently an Adjunct Professor in the Department of Engineering and Technology and the Director of the Electrical Machines Laboratory. His research interests include renewable energy systems and electric mobility.

Antonio J. Marques Cardoso received the Dipl. Eng., Dr. Eng., and Habilitation degrees from the University of Coimbra, Coimbra, Portugal, in 1985, 1995 and 2008, respectively, all in Electrical Engineering. From 1985 until 2011 he was with the University of Coimbra, Coimbra, Portugal, where he was Director of the Electrical Machines Laboratory. Since 2011 he has been with the University of Beira Interior (UBI), Covilhã, Portugal, where he is Full Professor at the Department of Electromechanical Engineering and Director of CISE - Electromechatronic Systems Research Centre (http://cise.ubi.pt).

Estudo da influência de carenagens na eficiência de painéis fotovoltaicos: Uma abordagem energética e fluidodinâmica

Thiago Lustosa Lima Dórea
thiagolustosa.ld@gmail.com
Centro Universitário SENAI CIMATEC, Brasil

Alex Álisson Bandeira Santos
alex.santos@fieb.org.br
Centro Universitário SENAI CIMATEC, Brasil

Turan Dias Oliveira
turan.oliveira@fieb.org.br
Centro Universitário SENAI CIMATEC, Brasil

João Pedro Brito de Andrade
joao.andrade@fieb.org.br
Centro Universitário SENAI CIMATEC, Brasil

Resumo:
O planeta Terra recebe todos os anos cerca de 170 petawatt de radiação solar, enquanto 30% dessa energia são refletidas de volta ao espaço o restante é absorvido pela Terra. Tal fator dá à energia solar o maior potencial de geração elétrica dentre todos os outros, porém pelo fato da tecnologia dos painéis solares ser recente, há ainda um baixo rendimento destes sistemas (13 - 15%). O Brasil, em especial, nas regiões dos estados do nordeste brasileiro possui vastas áreas para a sua implantação. Todavia, normalmente em regiões de elevada temperatura a eficiência dos equipamentos fotovoltaicos (painéis) diminui devido ao seu baixo resfriamento. Quanto melhor o resfriamento melhor a eficiência de geração fotovoltaica. Baseado nisso, a proposição do trabalho foi realizar simulações computacionais com CFD (dinâmica dos fluidos computacional) para testar estruturas de carenagem associados aos painéis fotovoltaicos disponíveis em mercado. Tais estruturas podem permitir uma maior vazão do ar atmosférico, visando o aumento da sua velocidade, promovendo um maior resfriamento, e consequentemente ampliando a eficiência dos painéis fotovoltaicos. Com isso, permitem-se algumas possibilidades de aplicação desse conceito em unidades de geração por energia solar. Com base nas velocidades de saída apresentadas nas simulações em CFD, foram feitas análises termodinâmicas utilizando a plataforma EES (Engineering Equation Solver), identificando os efeitos energéticos oriundos da instalação das carenagens propostas sobre a eficiência dos painéis.

Palavras-chave: Carenagem, CFD, Eficiência, Painéis fotovoltaicos.

Abstract:
The Earth receives every year about 170 petawatts of solar radiation, while 30% of that energy is reflected into space the rest is absorbed by Earth. This factor gives solar energy the greatest potential of electric generation among all others, but

because the technology of the solar panels is recent, there is still a low performance of these systems (13 - 15%). Brazil, particularly, in the regions of northeastern has vast areas for its implementation. However, typically in high temperature regions, the efficiency of photovoltaic equipment (panels) decreases due to its low cooling. The better the cooling the better the efficiency of photovoltaic generation. Based on this, the purpose of the work was to carry out computational simulations with CFD (Computational Fluid Dynamics) to test fairing structures associated with commercially available photovoltaic panels. Such structures may allow a higher flow rate of atmospheric air, aiming to increase its velocity with the goal of greater cooling and consequently an efficiency increase of photovoltaic panels. With this, some possibilities of application of this concept are allowed in units of generation by solar energy. Based on the output velocities presented in the CFD simulations, thermodynamic analyzes were performed using the EES (Engineering Equation Solver) platform, identifying the energetic effects of the installation of the proposed fairings on the efficiency of the panels.

Keywords: CFD, Efficiency, Fairing, Photovoltaic panels.

---

1 Introdução

O Brasil é um país de elevada extensão territorial e tem a maior parte de seu território localizado na região intertropical do planeta, possuindo, desta forma, um grande potencial para o aproveitamento de energia solar durante todo o ano. A região nordeste do país, em especial, apresenta os maiores índices de incidência solar anuais médios (5,9kWh/m2) e que apresenta menor variabilidade interanual (variando de 5,7 à 6,1 kWh/m2), representando, deste modo, a região com maior disponibilidade energética do país. Todavia a tecnologia atual só permite um aproveitamento de 13 à 15% da energia solar incidente em um dispositivo de geração fotovoltaica comercial.

Os painéis fotovoltaicos possuem um comportamento que varia conforme sua temperatura de operação, o acréscimo de temperatura no módulo fotovoltaico é acompanhado de uma queda na sua eficiência de geração de energia elétrica. Apesar do elevado índice de radiação solar ser favorável para a geração de energia nestes dispositivos, sua elevada intensidade provoca também um aumento de temperatura das células que o compõem. Desta forma o desenvolvimento de técnicas de resfriamento para estes dispositivos foi alvo de grandes estudos e pesquisas nos últimos anos.

Teo et al. Avaliaram a influência da mudança da taxa de fluxo de ar sob a eficiência dos painéis fotovoltaicos, onde a elevação da taxa resultou em resultados satisfatórios no aumento da eficiência de conversão de energia. Mojumder et al. Realizaram uma análise sob a temperatura

e a eficiência térmica e elétrica de um modulo fotovoltaico presente em um painel hibrido (térmico-fotovoltaico), onde foram realizados experimentos sob condições de diferentes radiações solares e de taxas de fluxo, com a variação de parâmetros sendo realizada de maneira independente e com o uso de exaustores para a variação da velocidade de ar atmosférico. Tonui et al. Concluíram que com a ventilação forçada há uma maior troca de calor por convecção que na ventilação natural, o sistema forçado promove um sistema com menor grau térmico e, consequentemente uma maior geração de energia elétrica. Elsafi et al. Estudaram o efeito de diferentes formas de aletas como triangular retangular e parabólica no arrefecimento dos painéis. Pottler e Naphon. Realizaram um estudo sobre o desempenho e geração de entropia de um aquecedor de ar solar de dupla passagem, onde mostraram que a eficiência térmica do módulo fotovoltaico aumenta com o aumento da taxa de fluxo e o coeficiente de transferência de calor aumenta com o aumento do número de Reynolds. Luis et al. Avaliaram, através de simulação numérica com aplicação de ferramentas CFD (Computation Fluid Dynamics), a influência da troca convectiva em painéis fotovoltaicos em regime de convecção natural sob diferentes temperaturas ambientes e condições de irradiação solar. Abe e Ohya Avaliaram através de ferramentas CFD, a influência da aplicação de uma carenagem de característica difusora para a aplicação a turbinas eólicas, onde obteve-se o aumento da velocidade do vento sob os rotores.

Tendo em vista a importância e a relevância de aplicação de técnicas que melhorem o arrefecimento de painéis fotovoltaicos e o trabalho desenvolvido por Abe e Ohya, o presente artigo teve, portanto, como objetivo o estudo e análise da influência energética da carenagem desenvolvida por Abe e Ohya aplicada aos painéis fotovoltaicos com aplicação de variações de abertura angulares. O trabalho foi desenvolvido através da utilização de técnica de simulação fluidodinâmica computacional CFD e da utilização de software de auxílio de cálculo EES (Engineering Equation Solver).

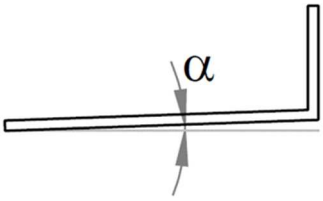
Neste trabalho estão inclusos a metodologia aplicada para a simulação computacional e para a análise da eficiência, bem como as equações termodinâmicas utilizadas no estudo e os resultados obtidos.

2 Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados o software de CAD 3D SolidWorks para a modelagem da carenagem a ser estudada. Para a análise do comportamento de fluido no sistema utilizou-se o software de simulação fluidodinâmica (CFD) ANSYS CFX, onde as

velocidades encontradas na análise dos resultados das simulações foram exportadas para o programa de auxílio de cálculo Engineering Equation Solver (EES), e onde através da associação de equações termodinâmicas relacionadas à convecção natural, convecção forçada, irradiação solar e reflexibilidade analisaram-se os impactos de diferentes condições aplicadas ao painel fotovoltaico, principalmente no campo de sua eficiência de geração de energia elétrica. Foi desenvolvida uma carenagem difusora com base no trabalho de Abe e Ohya para a realização de simulações. A carenagem está representada na figura 1 abaixo onde foi realizado um estudo com variações no angulo ∝, avaliando para 2º, 4º, 8º e 12º, as dimensões utilizadas para a construção da carenagem foram com base no trabalho de Abe e Ohya.

Figura 1 - Carenagem Estudada



Fonte: Próprio autor

2.1 Análise Fluidodinâmica

O software ANSYS CFX foi utilizado para através do método dos volumes finitos, resolver as equações de continuidade e de Navier Stokes, descritas nas Eqs. (1)-(4):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + div\,(\rho \vec{u}\,) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (pu)}{\partial t} + div(pu\vec{u}) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + div(\mu \quad grad \quad u) + S_{Mx} \tag{2}$$

$$\frac{\partial (pv)}{\partial t} + div(pv\vec{u}) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + div(\mu \quad grad \quad v) + S_{My} \tag{3}$$

$$\frac{\partial (pw)}{\partial t} + div(pw\vec{u}) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + div(\mu \quad grad \quad w) + S_{Mz} \tag{4}$$

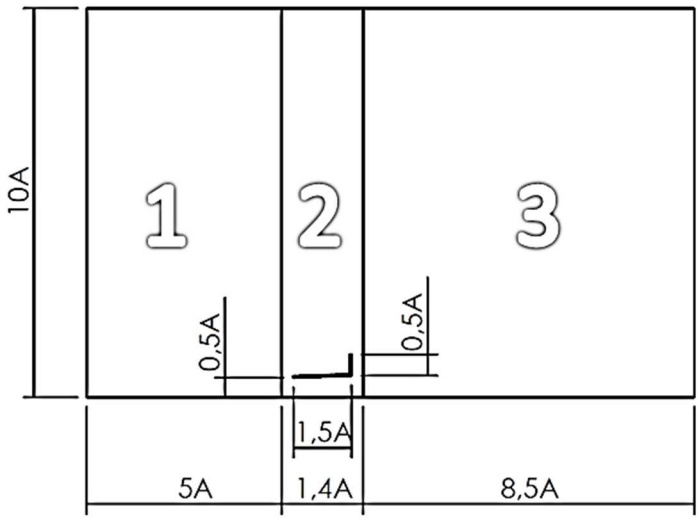
Onde p é pressão, t é tempo; x, y e z são, respectivamente, as três direções cartesianas; u, v e w são, respectivamente, as velocidades nas direções x, y e z; $\vec{u}$ é o vetor tridimensional de velocidade; μ é a viscosidade do fluido; S_{Mx}, S_{My} e S_{Mz} são os termos fontes de momento nas direções descritas em subscrito.

Para a análise de fluxo turbulento do sistema adotou-se o modelo k-ε proposto e detalhado por Jones e Launder, de forma que tal modelo oferece boas previsões para campos de fluxo extensos e que apresenta maior proximidade com dados experimentais.

2.1.1 Domínio

O ambiente estudado foi elaborado com 3 regiões distintas e está representado na figura 2, onde 1 representa a região de entrada de fluido, 2 a região que engloba a carenagem e 3 a região de saída. As dimensões adotadas para a construção do ambiente estão demonstradas na mesma imagem, onde A representa a abertura do difusor estudado e possui valor de 200 mm.

Figura 2 – Ambiente e dimensões

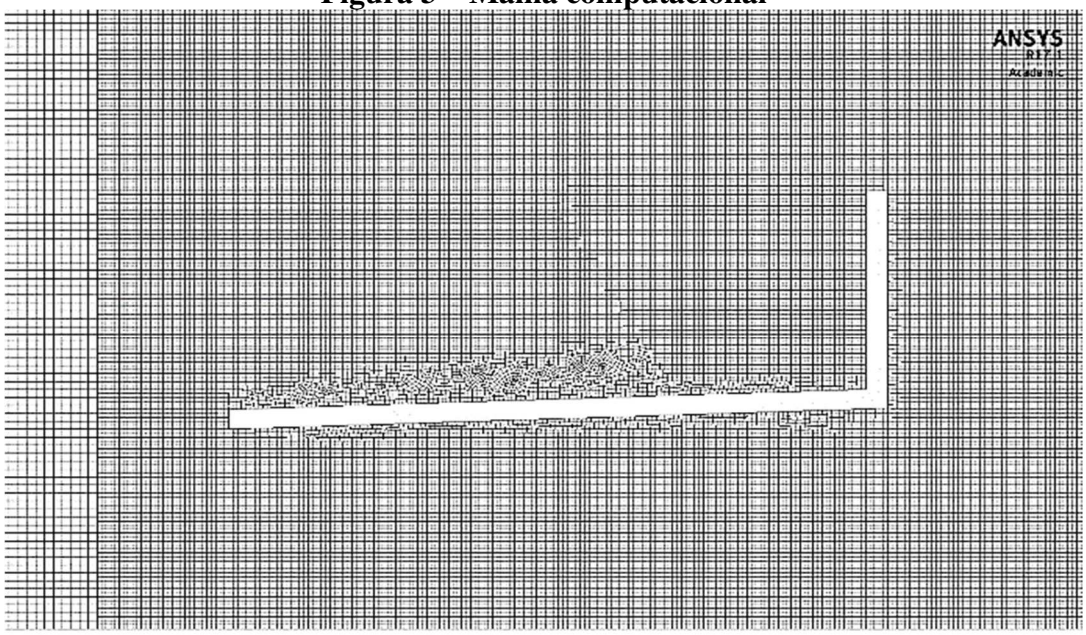


Fonte: Próprio autor

2.1.2 Malha Computacional

Para o emprego do método numérico foram geradas malhas computacionais para os as quatro angulações de difusores estudadas. Todas as malhas foram desenvolvidas de forma semelhante e a figura 3 exibe a malha desenvolvida para ângulo de 2°. A malha gerada foi elaborada com elementos de predominância quadrilátera, de forma que na região 1 é constituída por elementos de aresta 4mm e as demais elementos de aresta 2mm. O número de elementos em cada geometria estudada está demonstrado na tabela 1.

Figura 3 – Malha computacional



Fonte: Próprio autor

Tabela 1 – Números de elementos de cada geometria

Geometria	N° de elementos
2°	*1.184.238*
4°	*1.184.970*
8°	*1.185.250*
12°	*1.184.552*

Fonte: Próprio autor

2.1.3 Condições de Contorno

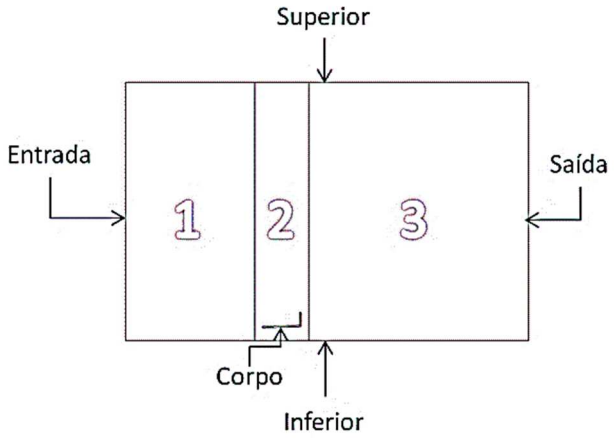
Os parâmetros adotados para a realização da simulação estão apresentados na tabela 2, e suas respectivas regiões na figura 4.

Tabela 2 – Parâmetros Utilizados

Região	Parâmetro
Entrada	*Velocidade constante de 1m/s*
Saída	*Pressão Atmosférica*
Superior	*Parede sem condição de não deslizamento*
Inferior	*Simetria*
Corpo	*Parede com condição de não deslizamento*

Fonte: Próprio autor

Figure 4 – Localização das regiões de contorno



Fonte: Próprio autor

2.2 Análise Termodinâmica

Para a realização da simulação da eficiência energética do estudo em questão, foi necessária a realização de um balanço de energia no qual foram levadas em consideração as perdas energéticas que estariam presentes no experimento prático. As perdas energéticas em questão são divididas em dois principais tipos perdas por convecção e por radiação. Todos os cálculos de potencias utilizadas na simulação tiveram como base os estudos de Incropera et al. A equação do balanço energético é representada na Eq. 5.

$$\mathrm{Psol} - \mathrm{Pceu} - \mathrm{Pchao} - \mathrm{Parsup} - \mathrm{Parinf} - \mathrm{Peletrica} = 0 \qquad (5)$$

em que:

Psol representa a potência da incidência do sol sobre o painel;

Pceu representa a perda por radiação da parte superior do painel para a atmosfera;

Pchao representa a perda por radiação da parte inferior do painel para a terra;

Parsup representa a perda convectiva da parte superior do painel podendo ser forçada e/ou natural.

Parinf representa a perda convectiva da parte inferior do painel podendo ser forçada e/ou natural.

Para melhor entendimento de todas as potências utilizadas no balanço energético serão destrinchadas.

A potência da incidência do sol, Psol, sobre o painel está representada na Eq. 6.

$$\mathrm{Psol} = \mathrm{I} * \mathrm{A} \tag{6}$$

em que:

I: Irradiação (W/m^2);

A: Área superficial do painel solar (m^2).

A incógnita Pceu está representada pela Eq. 7.

$$\mathrm{Pceu} = \mathrm{E1} * \sigma * \mathrm{A} * (\mathrm{Tsup}^4 - \mathrm{Tceu}^4) \tag{7}$$

em que:

E1: Poder emissivo da área superior do painel (W/m^2);

σ: Constante de Stefan-Boltzmann ($W/(m^2*K^4)$);

Tsup: Temperatura da parte superior do painel (K);

Tceu: Temperatura da atmosfera (K).

A incógnita Pchao está representada pela Eq. 8.

$$\mathrm{Pchao} = \mathrm{E2} * \sigma * \mathrm{A} * (\mathrm{Tinf}^4 - \mathrm{Tchao}^4) \tag{8}$$

em que:

E2: Poder emissivo da área inferior do painel (W/m^2);

Tinf: Temperatura da parte inferior do painel (K);

Tchao: Temperatura da terra (K).

A incógnita Parsup está representada pela Eq. 9.

$$\mathrm{Parsup} = (\mathrm{h1} + \mathrm{hfor1}) * \mathrm{A} * (\mathrm{Tsup}^4 - \mathrm{Tamb}^4) \tag{9}$$

em que:

h1: Coeficiente de transferência de calor por convecção natural da área superior ($W/(m^2*K)$);

hfor1: Coeficiente de transferência de calor por convecção forçada da área superior ($W/(m^2*K)$);

Tamb: Temperatura ambiente (K).

A incógnita Parinf está representada pela Eq. 10.

$$\mathrm{Parsup} = (\mathrm{h2} + \mathrm{hfor2}) * \mathrm{A} * (\mathrm{Tinf}^4 - \mathrm{Tamb}^4) \tag{10}$$

em que:

h2: Coeficiente de transferência de calor por convecção natural da área superior (W/(m^2*K));

hfor2: Coeficiente de transferência de calor por convecção forçada da área superior (W/(m^2*K));

A incógnita Parinf está representada pela Eq. 11.

$$\text{Peletrica} = \text{eff} * \text{I} * \text{A} \tag{11}$$

em que:

eff: Eficiência do painel solar

A eficiência real do painel é calculada em função de sua temperatura e da eficiência máxima, sua modelagem é apresentada na Eq. 12.

$$\text{eff} = \text{effmax} - \text{effmax} * 0{,}005 * (\text{Tsup} - \text{Teffmax}) \tag{12}$$

em que:

eff: Eficiência do painel solar;

effmax: Eficiência máxima do painel solar;

Teffmax: Temperatura do painel referente à eficiência máxima (K);

Tsup: Temperatura da superfície do painel (K).

3 Resultados

3.1 Análise Fluidodinâmica

A realização das simulações nas quatro geometrias permitiu a criação e análise dos perfis de velocidades que estão apresentados nas figuras 5 a 8. Uma análise da linha central do ambiente completo obteve-se a construção do gráfico apresentado na figura 9, permitindo a análise comparativa da velocidade de escoamento nos quatro casos estudados.

Figura 5 – Perfil de Velocidade para 2° (Fonte: Próprio autor)

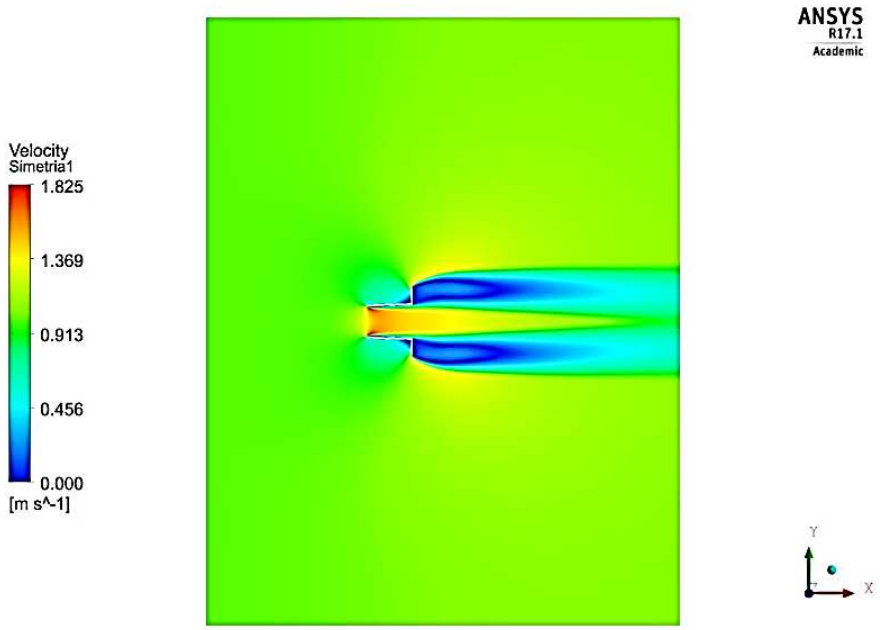


Figura 6 – Perfil de Velocidade para 4° (Fonte: Próprio autor)

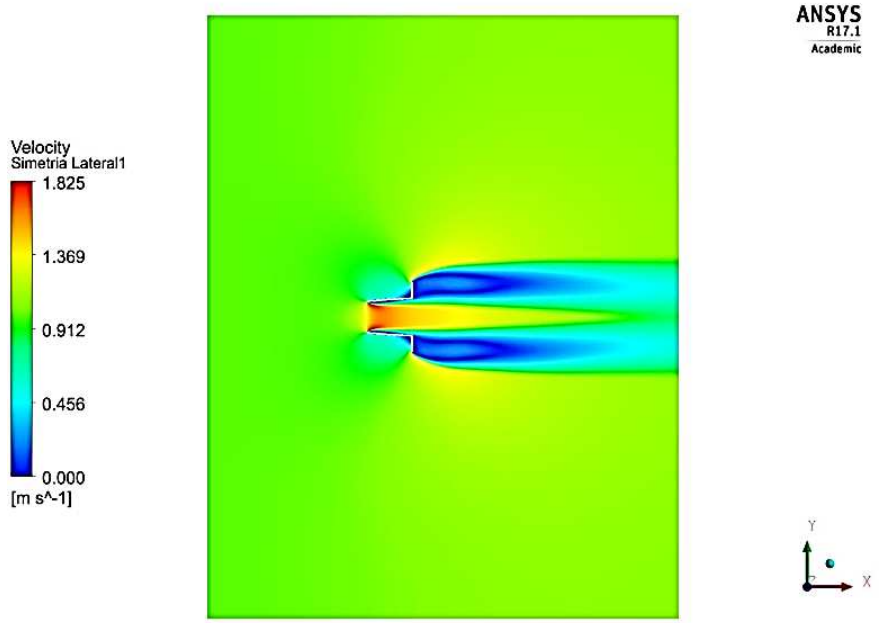


Figura 7 – Perfil de Velocidade para 8° (Fonte: Próprio autor)

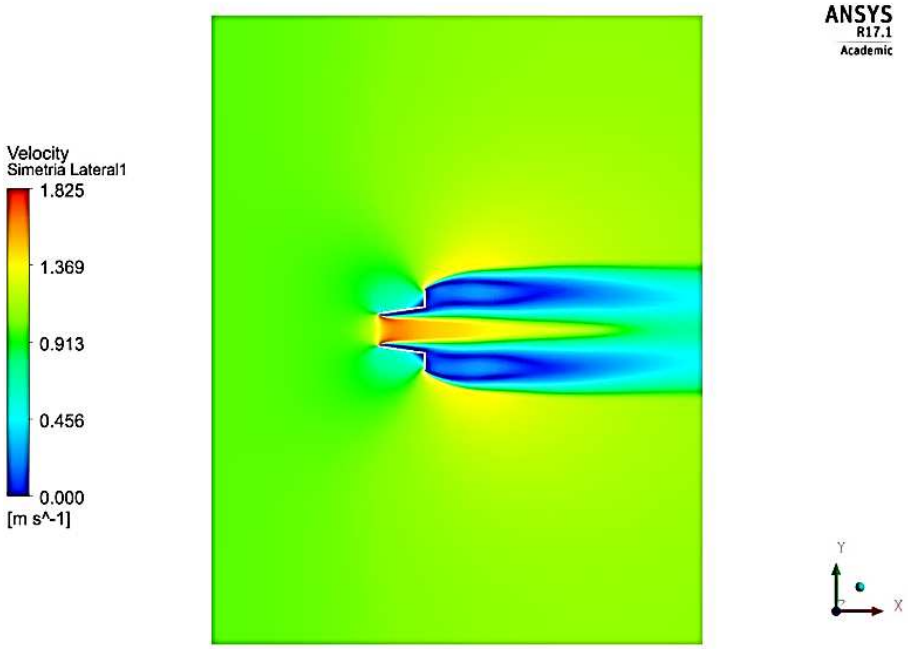


Figura 8 – Perfil de Velocidade para 12° (Fonte: Próprio autor)

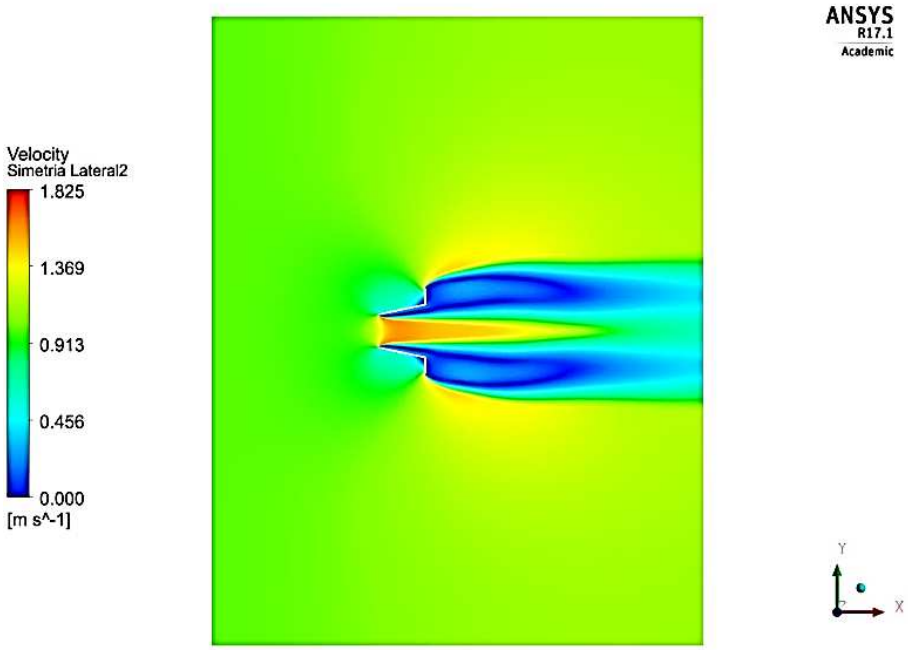
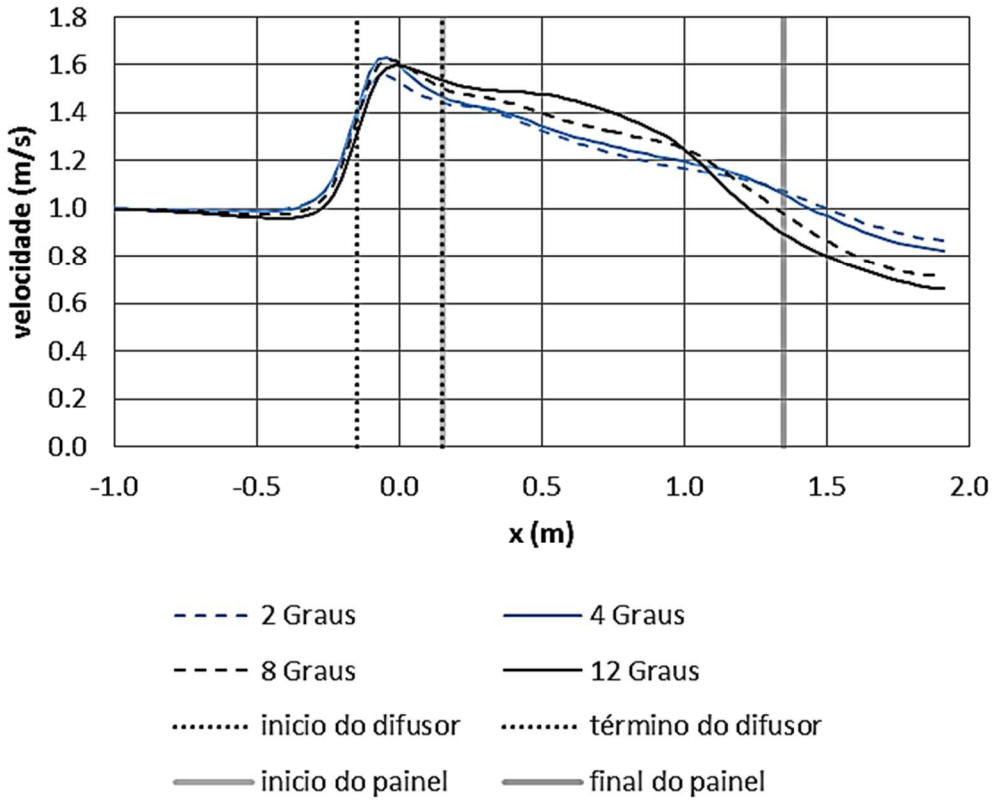


Figura 9 – Análise de Velocidades (Fonte: Próprio autor)



As médias das velocidades no trecho referente à extensão do painel, calculadas para realização da análise termodinâmica, são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Velocidade média sob o painel (Fonte: Próprio autor)

Geometria	Velocidade(m/s)
2°	*1,25*
4°	*1,27*
8°	*1,30*
12°	*1,32*

3.2 Análise Termodinâmica

Para a realização da análise termodinâmica foi necessário o conhecimento das propriedades padrões de painéis solares comerciais, desta forma, as dimensões e propriedades consideradas para a realização do balanço de energia e análise da eficiência estão apresentados nas tabelas 4 e 5.

Através do cálculo das velocidades médias e dada a melhor performance do difusor com 12 graus de angulação, uma análise termodinâmica comparativa pôde ser realizada entre o

comportamento do painel sem a presença do difusor, onde a velocidade permanece a 1m/s, e considerando a velocidade média do vento de 1,32m/s. As análises foram realizadas considerando uma temperatura ambiente fixa de 25ºC e com intensidades de irradiação solar variando de 400 a 900 W/m³ em intervalos fixos de 100W/m³. Os resultados sob a eficiência de geração de energia podem ser observados através do gráfico apresentado na figura 10.

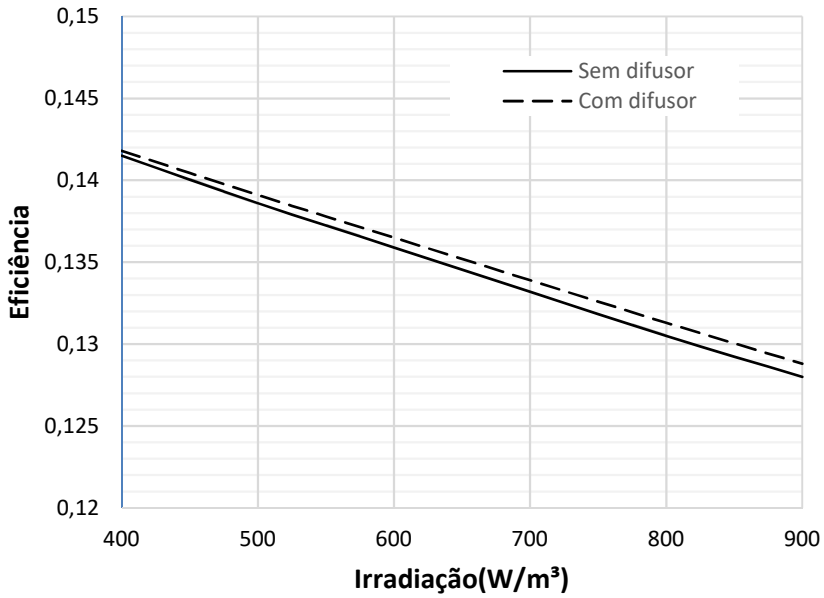
Tabela 4 – Dimensões do painel solar (Fonte: Próprio autor)

Dimensão	Medida(m)
Largura	*0,52*
Comprimento	*1,2*
Espessura	*0,01*

Tabela 5 – Propriedades do painel solar (Fonte: Próprio autor)

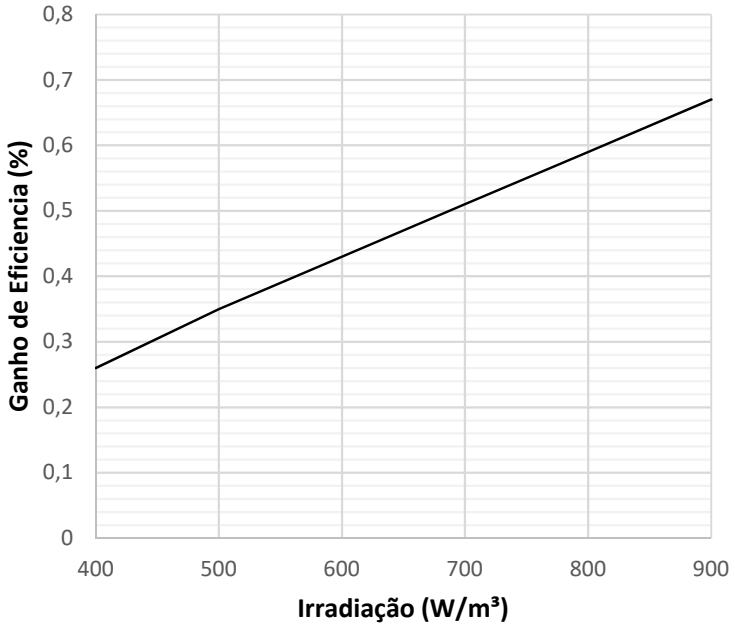
Propriedade	Valor
Condutividade	*148 W/(mK)*
Emissividade da superfície superior	*0,9*
Emissividade da superfície inferior	*0,5*
Eficiência máxima (superfícies à 25°)	*0,15*

Figura 10 – Eficiências com e sem difusor (Fonte: Próprio autor)



O resultado sobre a porcentagem de ganho pode ser observado no gráfico apresentado na figura 11.

Figura 11 – Ganho de Eficiência (Fonte: Próprio autor)



4 Conclusão

A aplicação de difusores com a geometria apresentada resultou em um aumento de velocidade de fluxo de ar considerável, principalmente para a angulação de 12º, onde houve um aumento médio de 32% no trecho referente à extensão do painel. O estudo termodinâmico do painel permitiu concluir que tal aumento de velocidade proporciona ganhos que variam de 0,25 a 0,67%, dependendo da irradiação solar em que o painel esteja submetido. Desta forma, a aplicação de carenagens de característica difusora representa um meio viável para o aumento da eficiência na geração de energia elétrica a partir do sol. É necessário ainda o aprofundamento de pesquisa para o estudo em outras angulações de abertura ou para a aplicação de tais carenagens em maiores escalas como em grandes parques solares.

Referências

Abe, K. e Ohya Y. (2004). An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. **92**:315-330.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (2000). *Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres*. Acedido em 20 de maio de 2017, em: http://www.cresesb.cepel.br/.

Elsafi, A.M. e Gandhidasan, P. (2015). Comparative study of double-pass flat and compound parabolic concentrated photovoltaic–thermal systems with and without fins. *Energy Conversion and Management*. **98**: 59–68.

Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. e Lavine, A.S. (2008). *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6ª Edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro.

Instituto Nacional de Meteorologia (1998). *Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. Versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície*. Acedido em 15 de fevereiro de 2018, em: http://www.inmet.gov.br.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2006). *Atlas Brasileiro de Energia solar*. Acedido em 20 de maio de 2017, em: http://www.inpe.br/.

Jones, W.P. e Launder, B.E. (1972). The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **15**:301-314.

Mattos G. M. (2016). *Estudo de rendimento e temperatura de painéis fotovoltaicos com uso de técnica de concentração solar*. Acedido em 03 de Maio de 2017 no Web site da: Universidade Federal do Rio de Janeiro: www.poli.ufrj.br/.

Mojumdera, J.C., Chonga, W.T., Onga, H.C., Leongb, K.Y. e Abdullah-Al-Mamoon. (2016). An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy and Buildings*. **130**:272-285.

Naphon, P. (2005). On the performance and entropy generation of the double-pass solar air heater with longitudinal fins. *Renew Energy*. **30**:1345–1357.

Pinheiro, L.A.R., Junior, A.P.B. e Silva, E.C.M. (2016). Convecção Natural em Painéis Fotovoltaicos. *CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica,* Fortaleza, Brasil, 21-25 Agosto 2016.

Pottler, K., Sippel, CM., Beck, A. e Fricke, J. (1999). Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. *Solar Energy*. **67**:35–52.

Teo, H.G., Lee, P.S., e Hawlader, M.N.A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*. **90**:309-315.

Tonui, J.K. e Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renew Energy*. **32**:623-637.

Authors Profiles:

Thiago Lustosa Lima Dórea student of mechanical engineering in the SENAI CIMATEC Technology School – Brazil, Salvador in 2018. He is now participating in the CAPES BRAFITEC exchange program at the Université Polytechnique Lyon 1 - France. His research interests are in the areas of Renewable Energy, Energy, Numerical Simulation and Automotive Engineering.

Alex Álisson Bandeira Santos has received a PhD from the Energy and Environment program of UFBA – Brazil, Salvador in 2010. He is now Pro-Rector of Post-Graduation and Research and Professor Researcher at the SENAI CIMATEC Technology School, and, Senior Member of the Brazilian Association of Engineering and Mechanical Sciences (ABCM). His research interests are in the areas of Energy, Industrial Combustion, Thermal Engineering, Industrial Maintenance, Energy Efficiency of Process and Industrial Equipment.

Turan Dias Oliveira has received a master's degree in Computer Modeling and Industrial Technology from the SENAI CIMATEC Technology School – Brazil, Salvador in 2015. He is now Professor and Researcher at the SENAI CIMATEC Technology School. His research interests are in the areas of Renewable Energy, Energy, Numerical Simulation, Energy Efficiency.

João Pedro Brito de Andrade e Souza student of mechanical engineering by the SENAI CIMATEC Technology School - Brazil, Salvador in 2018. He is now a mechanical engineering intern by Benteler within the Ford Northeast Industrial Complex. His interests are by renewable energy areas, focused on solar energy and automotive engineering

Modelo de simulação e análise de implantação de um sistema fotovoltaico: Estudo de caso em um centro de pesquisa

Thiago da Paz Caldas
thiagopc@chesf.gov.br
CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco, Brasil

Alex Álisson Bandeira Santos
alex.santos@fieb.br
SENAI CIMATEC – Campus Integrado de Manufatura e Tecnologias, Brasil

Resumo:
A necessidade de se diversificar a matriz energética mundial contribui para a implantação de fontes renováveis de energia, fator este que estimula a instalação de sistemas fotovoltaicos e a formação de recursos humanos com conhecimento básico nessa área, oferecendo alternativas que contribuam para o equilíbrio do meio ambiente. Para dar início a implantação de um sistema de geração de energia utilizando fonte solar, é importante avaliar a estimativa de energia elétrica que será produzida pelo sistema através de dados solarimétrico, levantamento do consumo de energia do cliente, orientação adequada dos painéis, insolação diária, local adequado para instalação, número de painéis fotovoltaicos, número de inversores e determinação dos circuitos de proteção, além de observar os custos relacionados ao projeto e o tempo de retorno do investimento que varia de acordo com o sistema a ser aplicado, tendendo a ser suscetível a mudanças bruscas devido principalmente às legislações, incentivos tributários por parte do governo e variações no preço dos equipamentos dos sistemas e das tarifas de energia. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede instalado em um centro de pesquisa através de métodos determinísticos como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), aplicado a partir do potencial de geração disponível na região da cidade de Salvador-Ba, fazendo referência as normas brasileiras que regulamentam a geração de energia elétrica através de fontes renováveis. Entretanto, existem condições de incertezas na economia e na implantação da tecnologia que podem provocar uma decisão precipitada.

Palavras-chave: Impactos da geração fotovoltaica, microgeração e minigeração, dimensionamento e simulação fotovoltaica.

Abstract:
The need to diversify the world energy matrix contributes to the deployment of renewable energy sources, a factor that stimulates the installation of photovoltaic systems and the training of human resources with basic knowledge in this area, offering alternatives that contribute to the balance of the environment . In order to start the implementation of a solar power generation system, it is important to evaluate the estimated electric energy that will be produced by the system through solarimetric data, customer energy consumption, adequate orientation of the panels, daily sunlight, suitable place for installation, number of photovoltaic panels, number of inverters and

determination of the protection circuits, besides observing the costs related to the project and the time of return of the investment that varies according to the system to be applied, tending to be susceptible to sudden changes mainly due to legislation, tax incentives by the government and variations in the price of systems equipment and energy tariffs. The objective of this work is to analyze the economic viability of a network-connected photovoltaic system installed in a research center using deterministic methods such as Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR), applied from the potential of available in the region of the city of Salvador-Ba, making reference to the Brazilian rules that regulate the generation of electric energy through renewable sources. However, there are conditions of uncertainties in the economy and in the implementation of the technology that can lead to a hasty decision.

Keywords: Impacts of photovoltaic energy, microgeneration and minigeration, sizing and photovoltaic simulation.

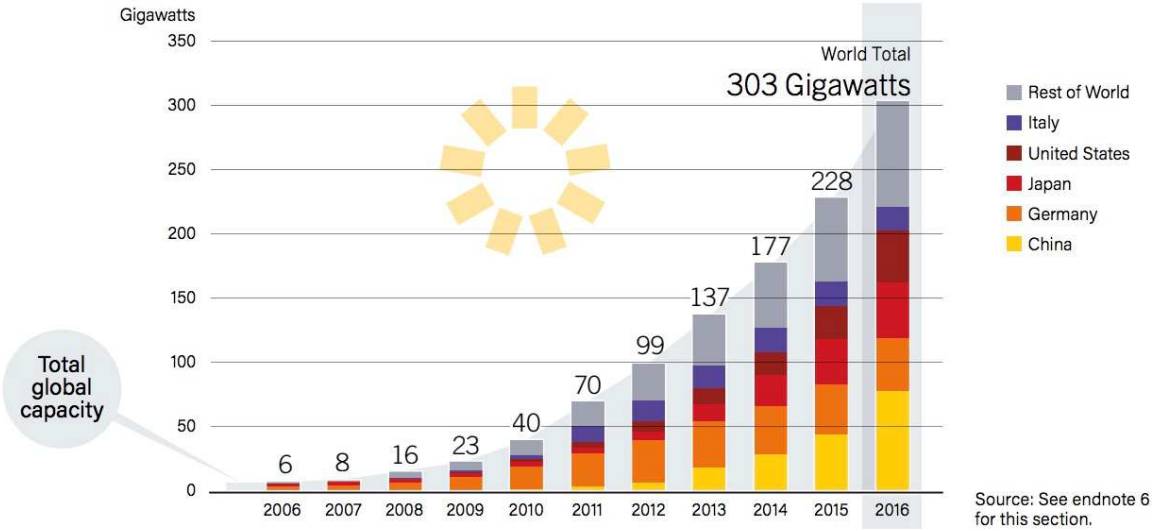
1 Introdução

Com a crise mundial do petróleo que ocorreu no início da década de 70 e a escassez, extração cada vez mais difícil, volatilidade dos preços e o aquecimento global agravaram os problemas relacionados à exploração de combustíveis fósseis para a produção e utilização de energia (NORBETO, 2016). Com isso houve uma preocupação em buscar novas formas de produção de energia fazendo com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais, mas que fossem intensamente estudados e utilizados no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia. Conforme divulgado pelo Global Status Report REN21 (2016), a energia fotovoltaica demonstrou um grande crescimento nos últimos anos, chegando a uma capacidade instalada de 227 GW, sendo que mais de 60% de toda essa geração entrou em operação entre 2011 e 2015. A China é o principal gerador de energia fotovoltaica do mundo, seguido por Alemanha, que tem como meta produzir 100% da sua energia através de fontes renováveis, Japão, Estados Unidos e Itália que também possuem capacidades instaladas consideráveis, como pode ser visto na figura 1.

Apesar de possuir um grande potencial solar com irradiações solares consideradas favoráveis para geração de eletricidade (acima de 4 kWh/m² por dia) em mais de 90% do território brasileiro (PINTO, 2016), o Brasil está longe de figurar entre os principais produtores de energia fotovoltaica. A maior geração de energia é através das hidrelétricas, além da eólica e a biomassa como fontes alternativas por serem mais baratas.

Assim, para o Brasil, a energia produzida por sistemas fotovoltaicos distribuídos conectados à rede ainda é uma tecnologia cara, não totalmente justificável frente às alternativas disponíveis no sistema brasileiro.

Figura 1 - Capacidade global de energia fotovoltaica



REN21 (2017)

Deve-se lembrar, ainda, que a forma como seus custos serão repartidos entre consumidores, concessionárias e governo não é clara e pode causar rejeição ao processo. Considerando o crescimento anual estimado do consumo de eletricidade de até 4,2% até 2023 e apesar do recente investimento de US$ 1,1 bilhão do governo, o país enfrenta uma crise energética que poderia ter sido evitada se fossem feitos investimentos e políticas para promover a fontes de energia renováveis (PINTO, 2016).

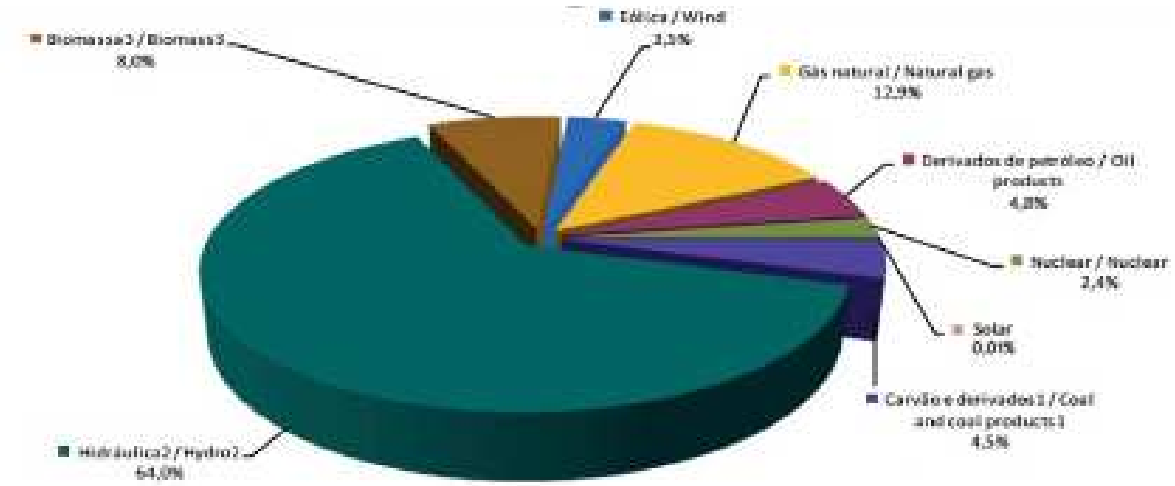
No Brasil, a regulamentação é um fator primordial para viabilizar essa forma de geração e mudanças significativas ocorreram nos últimos anos com ações de governo para o desenvolvimento desta fonte de energia. Segundo o Banco de Informação de Geração (BIG) divulgado pela ANEEL (2016), a capacidade de geração no Brasil conta atualmente com aproximadamente 23 MW em geração fotovoltaica em operação, onde a maior parte das instalações no país ocorrem em áreas isoladas (WWF ,2015). A figura 2 mostra a matriz de geração de energia elétrica dividido por tipo de fonte renováveis e não-renováveis do Brasil.

1.1 Energia Solar

A energia solar é uma forma de energia renovável e praticamente inesgotável, podendo ser utilizada através de sistemas de captação e conversão em energia térmica e elétrica, sendo uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio. E

quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol. É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade através das hidrelétricas (BRITO, 2003).

Figura 2 - Matriz Energética do Brasil



ANEEL (2016)

A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento, da radiação solar. O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, 1,5 x 1018 kWh de energia. Trata-se de um valor considerável, correspondendo a 10000 vezes o consumo mundial de energia neste período (BRITO, 2003). Além exercer um papel complementar às hidrelétricas, principal fonte de geração do País, a energia elétrica gerada pelo sol reduz o aumento do pico da demanda de energia durante o dia, não produz emissões durante a geração de energia elétrica, dispensa o uso de combustíveis, o que reduz o custo de geração. Além disso como a geração pode ser feita junto aos locais de consumo/carga, minimiza a necessidade de novas linhas de transmissão e aumenta a segurança energética (CBIC, 2016).

1.2 Potencial Solar do Brasil

Segundo EPE (2012), entre os principais trabalhos de avaliação do potencial da energia solar no Brasil estão o Atlas de Irradiação Solar do Brasil, de 1998, criado pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa

Catarina – UFSC, e o Atlas Solarimétrico do Brasil desenvolvido em 2000 pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco – Chesf, com apoio do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL por meio de seu Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB. Mais recentemente, em 2006, foi publicado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, produzido no âmbito do projeto SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment, sob coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Para estimativa do potencial de energia solar no Brasil, o Atlas Brasileiro de Energia Solar pode ser considerado a referência mais atual e completa.

Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país. O valor máximo de irradiação global - 6,5 kWh/m² - ocorre no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí. Essa área apresenta um clima semiárido com baixa precipitação ao longo do ano (aproximadamente 300mm/ano) e a média anual de cobertura de nuvens mais baixa do Brasil (JANNUZZI, 2013). A menor irradiação solar global - 4,25 kWh/m² - ocorre no litoral norte de Santa Catarina, caracterizado pela ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2500 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados (PEREIRA, 2006).

A Figura 3 apresenta o potencial anual médio de energia solar no Brasil, na qual a região Nordeste apresenta a maior disponibilidade energética seguida pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste. As características climáticas da região Norte reduzem seu potencial solar médio a valores próximos da região Sul.

1.3 Geração Distribuída

O termo "geração distribuída" está relacionado com a existência de qualquer forma de geração de energia elétrica, em sua maioria de pequeno porte e conectada na rede da distribuidora, localizada próximo do consumo (REIS, 2011). Esses sistemas podem ser isolados ou conectados à rede. Em sistemas isolados, a energia consumida é totalmente gerada por um sistema de geração de eletricidade individual através de uma unidade de consumo ou um grupo delas, como por exemplo, a geração eólica ou fotovoltaica. A integração com a rede permite a complementação do consumo pela compra de energia da rede ou pela venda da energia excedente para a distribuidora.

De acordo com CBIC (2016), os principais benefícios oferecidos pela geração distribuída são a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; o baixo impacto ambiental; a redução no carregamento das redes; a redução de perdas e a diversificação da matriz energética.

Figura 3 - Potencial anual médio de energia solar no Brasil

PEREIRA (2006)

1.4 Resolução Normativa N.º 482/2012

Segundo COSTA (2014) MIAN (2015), a regulamentação está sendo um ponto primordial para viabilizar essa forma de geração e mudanças significativas ocorreram nos últimos anos com ações do governo para o desenvolvimento desta fonte de energia como é o caso da resolução normativa no 482/2012 da ANEEL (2014) que em 2015 foi revisada dando origem a 687/15 onde detalha a microgeração e minigeração permitindo que o consumidor instale pequenos geradores (tais como painéis solares fotovoltaicos e microturbinas eólicas, entre outros) em sua unidade consumidora, injetando energia ativa na rede de distribuição e troque energia com a distribuidora local com objetivo de reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica através do Sistema de Compensação

de Energia. Segundo ANEEL (2015), essa modalidade, especificamente, visa beneficiar os consumidores atendidos por:

- Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

2 Materiais e Métodos

Esta pesquisa caracteriza-se por ser um estudo de caso da modalidade intrínseca, de natureza quantitativa, fazendo levantamento de custos para a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede, considerando a viabilidade através de ferramentas econômicas e a geração de riqueza a partir da aquisição destes sistemas.

2.1 Localização

Para dar início a um sistema fotovoltaico, tendo em vista o seu posterior dimensionamento e respectivo estudo de viabilidade técnica e financeira, é de grande importância conhecer bem o local da instalação. A visita ao local da instalação permitirá efetuar uma avaliação prévia sobre as condições básicas existentes, que poderão levar desde logo a uma indicação mais ou menos favorável sobre a instalação de um sistema fotovoltaico. A figura 4 mostra uma vista superior do centro de pesquisa em estudo, local escolhido para a simulação da geração fotovoltaica e seus impactos localizado na cidade de Salvador-Ba.

Figura 4 - Local de instalação do sistema fotovoltaico na cidade de Salvador/Ba

(Elaborada pelo autor)

2.2 Dados Solarimetricos

De acordo com VARELA (2007) CRONEMBERGER (2012) GUIMARÃES (2014), a irradiação solar diária média anual na cidade de Salvador é em média 5,27 kWh /m².dia, e para se obter esse valor os painéis devem estar posicionados com um ângulo de inclinação de 13º para o Norte que é o equivalente a latitude do local.

Figura 5 - Gráfico comparativo da irradiação solar diária média da região de Salvador [kWh/m².dia] por diferentes órgãos

(Elaborada pelo autor)

2.3 Equipamentos Utilizados

O próximo passo é a determinar aproximadamente a potência gerada pelo sistema fotovoltaico através do número de módulos instalados na área disponível. A tabela 1 reúne informações técnica do módulo fotovoltaico que será utilizado no trabalho.

Tabela 1 - Dados técnicos do painel fotovoltaico

Grandeza	Valor	Grandeza	Valor
Potência Nominal (W)	250	Coeficiente de temperatura (%/°C)	-44
Corrente Máxima (A)	8,15	Tensão Máxima (V)	30,7
Corrente circuito aberto (A)	8,63	Tensão de circuito aberto (V)	37,4
Eficiência (η)	15,36%	Área ocupada (m^2)	1,63

(Elaborada pelo autor)

Segundo FOTOVOLTAICA (2015), para a escolha do inversor deve-se verificar no catálogo do equipamento as seguintes informações: a potência nominal do inversor, a tensão de entrada do inversor, coeficientes de temperatura do modulo fotovoltaica, verificar a temperatura do painel fotovoltaico (verão e inverno). A escolha do inversor geralmente é feita com uma potência ligeiramente menor do que a potência do gerador fotovoltaico. A relação seguinte determina a escolha da melhor faixa de potência de operação entre o inversor e o gerador fotovoltaico (MELO, 2014):

$$0{,}9 \times PFV < Pinvcc < 1{,}1 \times PFV \quad (1)$$

Tabela 2 - Dados técnicos do inversor

Grandeza	Valor	Grandeza	Valor
Tensão Máxima Suportada (V)	1000	Potência Nominal AC (kW)	450
Minima Tensão de Operação (V)	450	Potência Máxima AC (kW)	495
Tensão Nominal de Operação (V)	563	Corrente Nominal AC (A)	965
Corrente Máxima AC (A)	965	Corrente Máxima AC (A)	1062
Máxima Eficiência (η)	98,2%		

(Elaborada pelo autor)

2.4 Estimativa da energia produzida pelo Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

A produtividade, expressa em Wh/Wp/ano, resulta em um fator de capacidade que é parâmetro básico para análise da competitividade da geração solar fotovoltaica e depende do índice de irradiação solar, da localização, e da área disponível.

Para calcula a potência necessária para alcançar determinada quantidade de energia, temos a seguinte expressão (FOTOVOLTAICA, 2015):

$$Ppico = \frac{E\ x\ Psol}{Gpoa\ x\ PR} \tag{2}$$

Ppico = potência pico do painel fotovoltaico (kWp);

E = energia consumida mensalmente pelas cargas (kWh/mês);

Psol = irradiância de referência (kW/m²);

Gpoa = irradiância diária no plano dos módulos (kWh/m².dia);

PR = *Performance Ratio* (coeficiente de desempenho).

Segundo REIS (2011), é atribuído 1 kW/m² para a irradiância de referência considerando condições de céu claro sem nuvens, ao meio dia e localizado ao nível do mar, 1,05 kW/m² a 1000 metros de altura e 1,1 kW/m² em regiões montanhosas. A *performance ratio* (PR) é uma a relação entre o desempenho teórico do sistema fotovoltaico relacionado com o desempenho real dele. Fatores como altas temperaturas, desvio da potência nominal, sujeira dos painéis, efeito *mismatching*, perdas ôhmicas, sombreamento e eficiência do inversor podem afetar o desempenho do sistema fotovoltaico. Para a região do Brasil, a *performace ratio* está situada entre 75% e 80% (COSTA, 2014) (FOTOVOLTAICA, 2015) (SILVA, 2016).

2.5 Determinação do custo da energia gerada pelo Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Para se avaliar o custo da energia fotovoltaica, deve-se usar a definição de fator de capacidade (FC), que determina a quantidade de energia que o sistema pode produzir em um determinado período de tempo em razão da energia que esse mesmo sistema seria capaz de gerar se operasse com sua potência nominal durante esse período (MELO, 2014) (SECUNDES, 2015) (RODRÍGUES, 2002). Para uma análise anual, o FC é determinado através da equação seguinte:

$$FC = \frac{EAC}{PNominal\ x\ 8760} \tag{3}$$

FC = Fator de capacidade;

EAC = Energia anual produzida pelo sistema calculada segundo a subseção 3.1;

PNominal = Potência nominal instalada ou potência máxima entregue pelo gerador fotovoltaico nas condições padrão de teste (STC).

De posse do valor do fator de capacidade, o custo da energia produzida pelo o sistema fotovoltaico pode ser calculada conforme a equação (RODRÍGUES, 2002) (BENEDITO, 2009):

(4)

C = Custo de geração, em centavos de R$/kWh;

r = Taxa anual de desconto;

n = Vida útil do sistema em anos;

O&M = Porcentagem do capital inicial necessário por ano para operação e manutenção;

Inv = Investimento inicial em R$/kWp;

2.6 Viabilidade Econômica

Nesse trabalho, a atratividade do investimento será constatada se o valor do custo nivelado de geração (LCOE), expresso em R$/MWh, for menor ou igual ao valor da tarifa praticada para a unidade consumidora, o VPL é positivo e a TIR é igual ou superior ao custo de oportunidade de capital ou taxa de desconto adotada.

De acordo com LACCHINI (2013) e SHIMURA (2016), as empresas do setor de energia fotovoltaica estimam o LCOE utilizando a equação:

$$LCOE = \frac{CAPEX + PV(OPEX)}{PV(PE)} \tag{5}$$

LCOE = Custo de Energia (R$ / kWh);

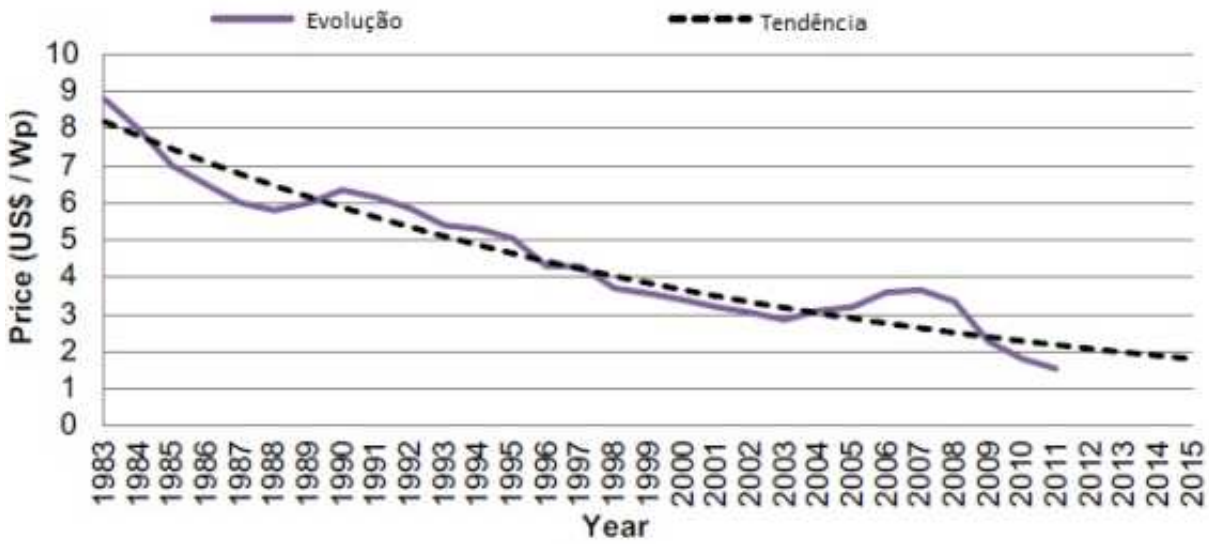
CAPEX = Despesas de capital (R$);

PV(OPEX) = Valor presente das operações e manutenções em toda vida útil do sistema fotovoltaico (R$);

PV(PE) = Valor presente do total de energia fornecida durante a vida útil do sistema fotovoltaico (kWh).

De acordo com WANG (2011), o LCOE está também relacionado com a eficiência dos painéis fotovoltaicos mesmo se o preço do módulo (R$ W) permanecer o mesmo. Quando o custo nivelado da geração (CNG) ou LCOE atinge o preço de fornecimento da rede elétrica, diz-se que foi atingida a paridade tarifária, isto significa que o consumidor pode escolher entre comprar a energia que necessita da distribuidora ou gerar a sua própria eletricidade, utilizando as tecnologias de geração distribuídas disponíveis e que melhor se adequem ao seu perfil de consumo (COSTA, 2014). O preço do watt-pico instalado (R$/kWp) e as tarifas de energia (R$/kWh) da área de concessão onde se instalará o sistema de geração são variáveis fundamentais na análise de viabilidade (CBIC, 2016). A figura 6 mostra a evolução dos custos da energia fotovoltaica ao longo dos anos.

Figura 6 - Queda de preço da energia solar ao longo dos anos



LACCHINI (2013)

Payback que em português significa "retorno" é uma técnica muito utilizada para análise do prazo de retorno do investimento em um projeto. É, portanto, o tempo de retorno do investimento inicial até o momento no qual o ganho acumulado se igual ao valor deste investimento. Normalmente este período é medido em meses ou anos. Para um payback ser considerado aceitável na nossa pesquisa, o tempo de retorno deve ser inferior a 10 anos que é definido da seguinte forma (JÄGER, 2014):

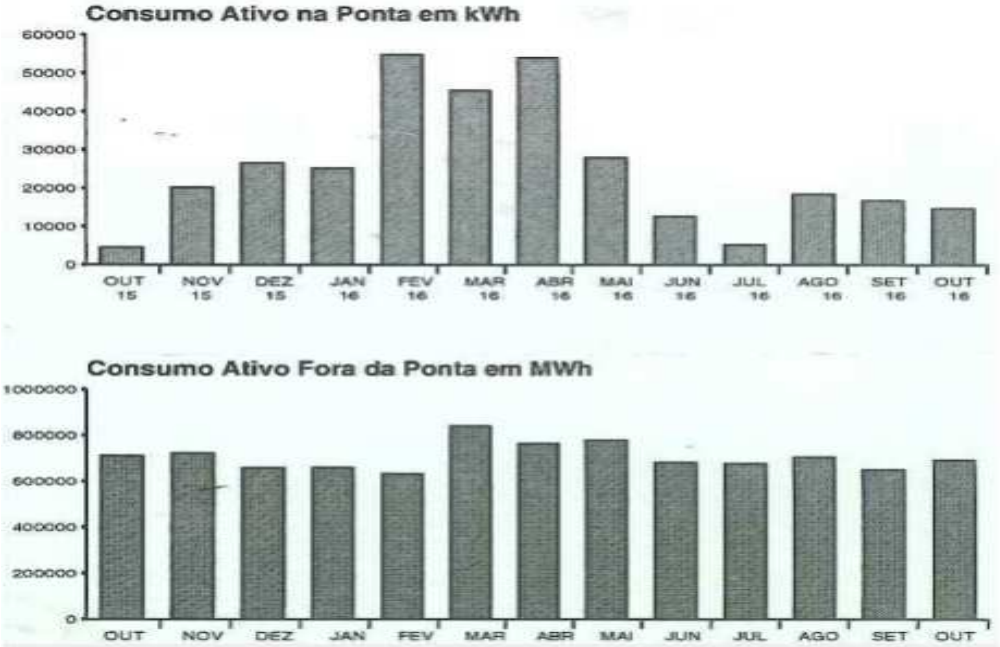
$$Payback = \frac{Investimento\ Inicial}{Retorno\ Anual} \tag{6}$$

Porém, nessa pesquisa será calculado o payback levando em consideração as perdas anuais do sistema fotovoltaico conectado à rede e o aumento anual da tarifa de energia ao longo do tempo.

2.7 Curva de carga do centro de pesquisa

Segundo levantamento feito através de análise das contas de energia da instituição, foi possível determinar de forma mais precisa o consumo da edificação. Por se enquadrar como consumidor comercial, a fatura é dividida por consumo no horário de ponta e fora da ponta. Será levado em conta apenas o consumo ativo fora da ponta que é onde ocorre a geração de energia fotovoltaica. Nesse período, o consumo médio mensal do centro de pesquisa é de 640 MWh totalizando 7,68 GWh anual. Na instalação do sistema fotovoltaico foi levando em consideração o posicionamento dos painéis fotovoltaicos orientados com base na latitude do local, desconsiderando possíveis perdas relacionado a sombreamento. Como o objetivo é instalar um sistema fotovoltaico conectado à rede permitindo ao consumidor obter um certo grau de autossuficiência no consumo de energia, foi considerado um sistema com uma potência instalada que permita atender a demanda de energia de um centro de pesquisa.

Figura 7 - Consumo ativo anual do centro de pesquisa em diferentes horários



(Elaborada pelo autor)

Para atender o consumo médio anual de 7.68 GWh, seria necessário um sistema de aproximadamente 5000 kWp, ou seja, 5MWp que é o valor máximo autorizado para minigeração conforme a resolução normativa no 687/15, podendo esse sistema ser conectado em média ou alta tensão. Porém, devido a limitações impostas por essa resolução normativa, a potência máxima instalada em um consumidor do grupo é limitada pela demanda contratada que nesse caso é 2100 kW.

3 Resultados e considerações finais

Considerando a produção de energia que um sistema fotovoltaico conectado a rede pode oferecer, de acordo com os dados de irradiação locais, perdas relacionadas ao desempenho do sistema e o rendimento global da instalação, neste capítulo são simuladas algumas das principais abordagens para avaliar a energia produzida por um sistema fotovoltaico conectado à rede, seja através de incentivos tarifários, seja através da concessão de incentivos econômicos na forma de subsídio para diminuir o custo da instalação. A influência destes modos de incentivos na viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede é demonstrada bem como as suas consequências econômicas para o centro de pesquisa. Também são simulados cenários que promovem a implementação conjunta de incentivos tarifários e econômicos.

3.1 Custos

A competitividade da geração fotovoltaica distribuída foi analisada com base na estimativa do custo equivalente ou nivelado da geração, expresso em R$/kWh, o qual foi comparado com os valores da tarifa paga pelo centro de pesquisa à concessionária. No Brasil, existem tarifas horárias que estão divididas em azul e verde. Tais tarifas têm preços diferenciados em relação às horas do dia, onde o período na ponta (NP), que está compreendido das 18 às 21 horas, possui o preço do kWh mais caro em comparação com as demais horas do dia que são classificadas como fora ponta (FP). O preço da energia fornecida aos consumidores finais pela distribuidora no estado da Bahia é composto pelo consumo da energia em kWh/mês, acrescido os Imposto de Circulação de Mercadoria e Serviços - ICMS, imposto do Programa de Integração Social – PIS e a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social - COFINS.

O centro de pesquisa em questão é tarifado pela categoria verde e os valores cobrados pela distribuidora local estão descritos na tabela 3:

Tabela 3 - Custo da energia da distribuidora local

Descrição	Tarifa (R$)	ICMS	PIS/COFINS	PREÇO FINAL
kWh NP	1,46165000	27%	5,60%	2,16862017
kWh FP	0,23894000	27%	5,60%	0,35451038
kVArh	0,21420000	27%	5,60%	0,31780415
kW / kVAr	16,01000000	27%	5,60%	23,75370919
kW Ultrapassagem	32,02000000	27%	5,60%	47,50741839

(Elaborada pelo autor)

Essa pesquisa levou em consideração apenas o consumo de energia da rede de distribuição no período fora da ponta, já que durante o horário de ponta o centro de pesquisa utiliza um grupo de geradores a diesel para suprir o consumo evitando a utilização da rede da distribuidora de energia no período mais oneroso.

Na tabela a seguir estão descritos os dados do sistema fotovoltaico e o cenário que serão utilizados nas simulações seguintes.

Tabela 4 - Dados utilizados na simulação

Potência do sistema (kWp)	2100
Perda de eficiência anual do sistemas até o 10º ano [%]	0.4
Perda de eficiência anual do sistemas após o 10º ano [%]	0.65
Aumento anual do preço da eletricidade (%)	6
Tempo de vida útil do sistema (em anos)	25
Custos de operação e manutenção em função do investimento (%)	1
Área necessária para instalação (em m^2)	13.608

(Elaborada pelo autor)

Considerando os custos divulgados através das previsões e sistemas fotovoltaicos conectados à rede já instalados no Brasil (EPE, 2012) (EPE, 2014a) (EPE, 2014b), foram calculados os custos de um sistema com potência inicialmente de 2100 kWp para atender o centro de pesquisa. Os resultados estão descritos na tabela 5 que possui preços encontrados durante a pesquisa seguido dos custos total para um sistema de 2100 kWp considerando também e compra direta sem intermediários*.

Tabela 5 - Custos do investimento fotovoltaico

CASO	Autor	Preço por Wp	Investimento Inicial	Custo total durante a vida útil
1	EPE (2014b)Previsão 2030	R$ 3,59	R$ 6.024.479,10	R$ 7.530.598,88
2	EPE (2014b)Previsão 2020	R$ 4,56	R$ 7.667.518,86	R$ 9.584.398,57
3	EPE (2014a)	R$ 5,10	R$ 8.567.998,73	R$ 10.709.998,41
4	EPE (2012)	R$ 5,20	R$ 8.735.998,70	R$ 10.919.998,38
5	*Perlotti *et al.* (2012)	R$ 5,37	R$ 9.021.598,66	R$ 11.276.998,32
6	EPE (2012) sem tribuitos	R$ 6,31	R$ 10.600.798,42	R$ 13.250.998,03
7	EPE (2012)	R$ 7,76	R$ 13.034.782,06	R$ 16.293.477,58
8	EPE (2012) com tributos	R$ 8,36	R$ 14.044.797,91	R$ 17.555.997,39
9	**Holdermann, Kissel & Beigel (2014)	R$ 8,59	R$ 14.431.029,85	R$ 18.038.787,32
10	*Shiruma (2016)	R$ 8,92	R$ 14.982.331,85	R$ 18.727.914,81
11	*Lacchini & Santos (2013)	R$ 11,83	R$ 19.876.728,21	R$ 24.845.910,26
12	*Alnaser, Al-naser & Batarseh (2014)	R$ 16,30	R$ 27.383.995,93	R$ 34.229.994,91

(Elaborada pelo autor)

3.2 Economia de energia

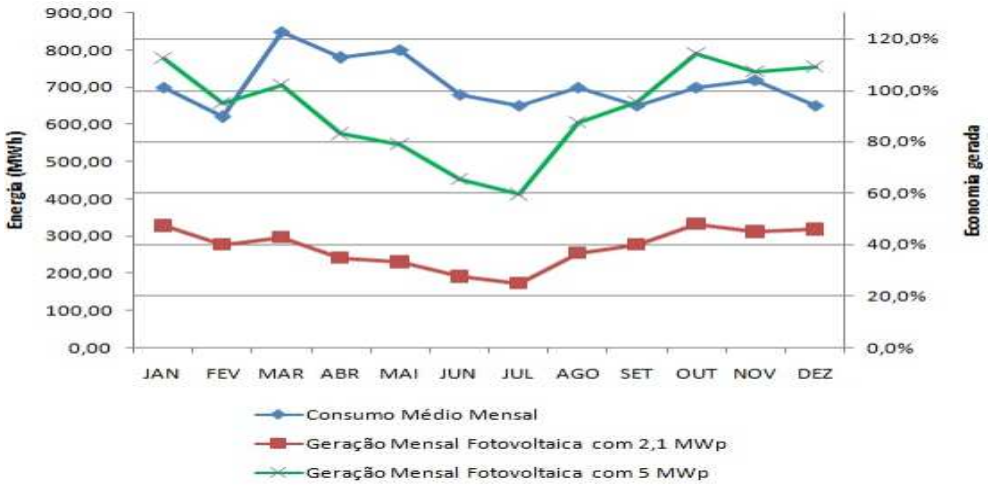
Os resultados da geração fotovoltaica mensal de um sistema limitado pela norma nº 482/2012 e um sistema de maior porte comparando-os com o consumo FP de potência ativa do centro de pesquisa disponível em um mesmo período. Os dados foram organizados, em MWh/mês, conforme visualizado na tabela 6.

Tabela 6 - Contribuição da geração fotovoltaica com diferentes sistemas em relação ao consumo energético do centro de pesquisa.

Mês	Consumo Médio	Geração Fotovoltaica Sistema 2,1 MWp	Economia	Geração Fotovoltaica Sistema 5 MWp	Economia
JAN	700,00	326,9	46,7%	778,3	111,2%
FEV	620,00	276,5	44,6%	658,3	106,2%
MAR	850,00	296,5	34,9%	705,9	83,0%
ABR	780,00	241,2	30,9%	574,3	73,6%
MAI	800,00	229,3	28,7%	545,9	68,2%
JUN	680,00	190,0	27,9%	452,3	66,5%
JUL	650,00	173,0	26,6%	411,9	63,4%
AGO	700,00	254,2	36,3%	605,1	86,4%
SET	650,00	277,5	42,7%	660,7	101,6%
OUT	700,00	332,3	47,5%	791,1	113,0%
NOV	720,00	311,3	43,2%	741,1	102,9%
DEZ	650,00	317,4	48,8%	755,5	116,2%
TOTAL	8.500,00	3226,6	38,0%	7681,1	90,4%

(Elaborada pelo autor)

Figura 8 - Gráfico do resultado da comparação entre energia gerada por diferentes sistemas e o consumo da distribuidora.



(Elaborada pelo autor)

É possível perceber através do gráfico da figura 8, que um sistema fotovoltaico conectado à rede com uma potência instalada de 2100 kW produzirá uma redução no consumo anual de energia no horário fora da ponta do centro de pesquisa de 38%, chegando a 42% na época do verão. Já um sistema de 5 MWp instalado nas mesmas condições traria uma economia de 90% no consumo anual de energia no horário fora da ponta, considerando o fornecimento de energia a rede nos meses onde a geração for maior que o consumo, e a compensação nos meses onde isso não ocorre.

No entanto, esta análise não garante que a máxima geração esteja ocorrendo no dia de máximo consumo. Para isto, se faz necessária uma avaliação dia a dia.

3.3 Payback

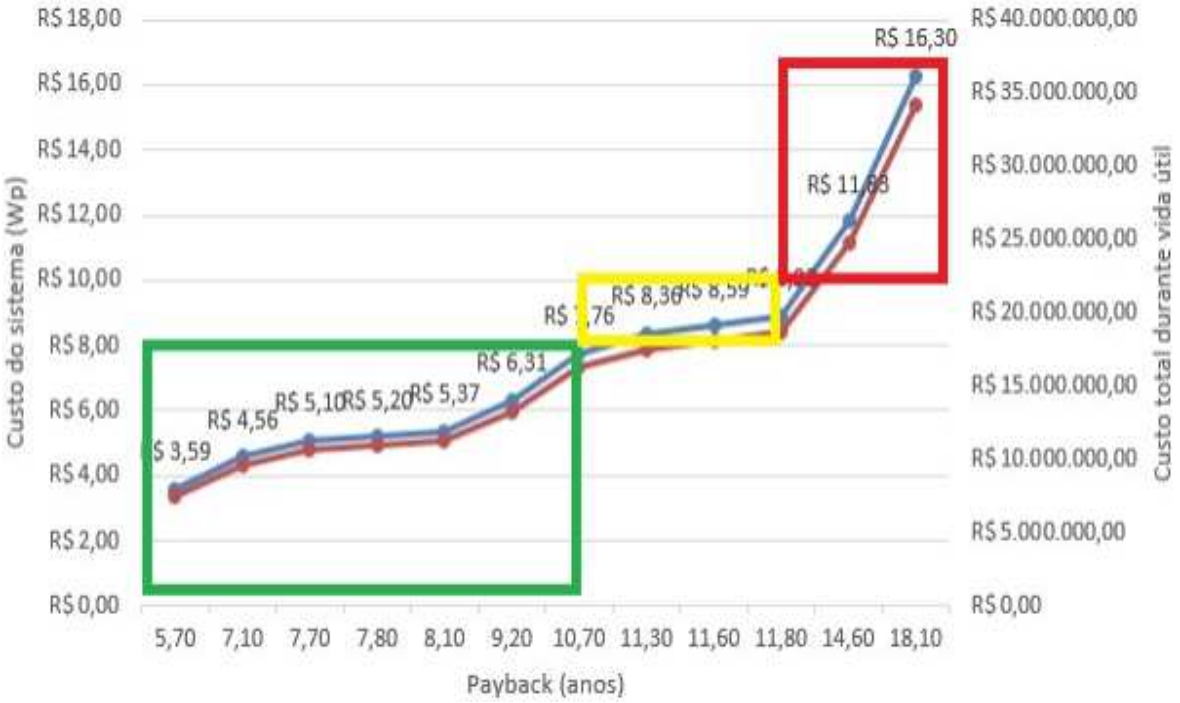
Em relação ao tempo de retorno, para que um sistema fotovoltaico conectado à rede seja considerado viável no centro de pesquisa em questão, é necessário que o preço em R$/kWp não seja maior do que R$ 8.000. Para valores situados entre R$ 8.000 e R$10.000 teremos um payback de 10 a 12 anos que é considerado um período razoável. Valores acima de R$ 10.000 inviabiliza a instalação do sistema fotovoltaico. A figura 9 demonstra o tempo de retorno para diferentes valores de potência, onde a região verde atribui viabilidade, a amarela uma região duvidosa e a vermelha inviabiliza o projeto.

3.4 Considerações finais

De acordo com as tabelas e gráficos obtidos na análise de simulações anteriores entre geração fotovoltaica e consumo energético, outra questão que pode ser avaliada é a recontratação de demanda. O centro de pesquisa em questão possui um contrato de demanda com a concessionária local e mesmo que a unidade consumidora não demande toda a potência contratada, deve pagar por ela.

Caso ultrapasse a demanda contratada, a tarifa do kWh ultrapassado é bem superior à tarifa convencional, funcionando como uma punição pelo excesso. Portanto, uma boa previsão de demanda máxima é fundamental e, quanto menor ela for, menor o custo para a empresa. Neste contexto, a geração fotovoltaica pode se apresentar como uma opção interessante para reduzir a demanda contratada, proporcionando tanto a economia com a nova demanda contratada, quanto com os custos evitados em ultrapassagem de demanda.

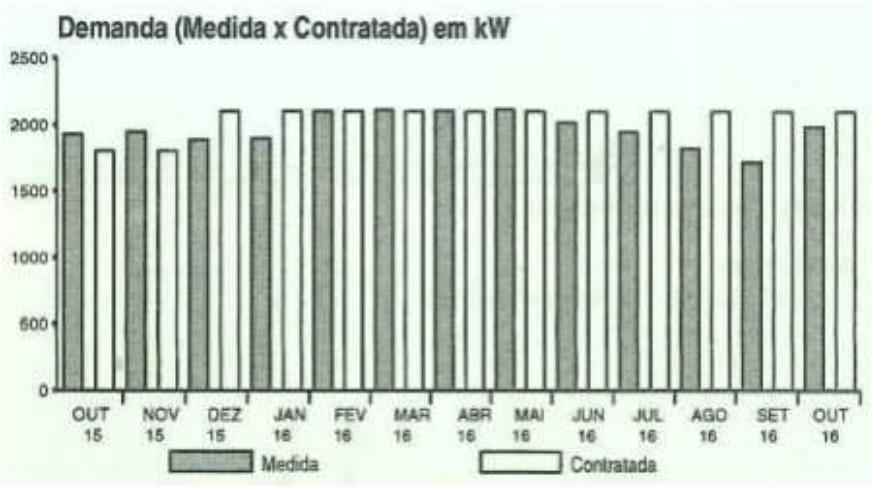
Figura 9 - Análise de Payback



(Elaborada pelo autor)

A figura 10 apresenta as demandas contra contratadas e medidas para cada mês durante o período de outubro de 2015 e outubro de 2016.

Figura 10: Demanda contratada do centro de pesquisa



(Elaborada pelo autor)

O centro de pesquisa modificou seu contrato uma única vez no período informado e atualmente possui contratada uma demanda ativa de 2100 kW. Porém devido a limitações impostas pela resolução normativa onde a potência do sistema fotovoltaico não deve ser maior que a demanda

contratada, caso se opte por uma recontratação de demanda, a potência do sistema fotovoltaico também deve acompanhar uma provável redução, prejudicando a economia que o sistema pode gerar.

4 Referências

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa. Resolução Normativa Nº 687, 2015.

ANEEL, Banco de Informação de Geração. Big. Agência Nacional Energia Elétrica, v. 9, n. 02, 2016.

ANEEL, Cadernos Temáticos. Micro e minigeração distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Centro de Documentação–Cedoc , Brasília, DF, Brasil:, 2014.

BENEDITO, Ricardo da Silva. Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório. Dissertação (Mestre em Ciências) — Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2009.

BRITO, Sérgio de Salvo. Energia solar princípios e aplicações. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2003.

CBIC, Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Gestão eficiente da energia na indústria da construção. 2016

COSTA, Thiago Mendes Germano; SOUZA, Márcio Eli Moreira; SILVA, Selênio Rocha. "Uma discussão quanto a inserção de sistemas fotovoltaicos em redes elétricas–um estudo de caso." Simpósio Brasileiro de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu–PR, Brasil, 2014.

CRONEMBERGER, Joara; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; SÁNCHEZ, Sergio Vega. "Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes–making the case for Brazil." Energy and Buildings, Elsevier, v. 55, p. 264–272, 2012.

EPE (2012) EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Nota técnica: Análise da inserção solar na matriz elétrica brasileira. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

EPE (2014) EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Leilão de energia de reserva de 2014 - participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos: Visão geral. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

EPE (2014) EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Nota técnica: Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil – condicionantes e impactos. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Nota técnica: Análise da inserção solar na matriz elétrica brasileira. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

FOTOVOLTAICA-UFSC, Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina. Aula Introdução ao Dimensionamento dos Sistemas Fotovoltaicos – Parte II (05/11/2015). 2015.

GUIMARÃES, Ana Paula C.; GALDINO, Marco A. Potencial Solar - SunData. 2014.

JÄGER, K et al. Solar Energy-Fundamentals, Technology, and Systems. [S.l.: s.n.], 2014.

JANNUZZI, Gilberto de Martino; MELO, Conrado Augustus de. "Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects." Energy For Sustainable Development, Elsevier, v. 17, n. 1, p. 40–46, 2013

LACCHINI, Corrado; SANTOS, João Carlos V Dos. "Photovoltaic energy generation in Brazil–cost analysis using coal-fired power plants as comparison." Renewable energy, Elsevier, v. 52, p. 183–189, 2013.

MELO, Fernando Cardoso. Projeto e análise de desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão em conformidade com a resolução normativa 482 da Aneel. Mestrado em Ciência, Uberlândia: [s.n.], Brasil, 2014.

MIAN, Helena Magalhães. "Análise regulatória da participação da energia solar fotovoltaica e estudo do melhor mecanismo de suporte para inseri-la na matriz elétrica brasileira." Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2015.

NORBERTO, Carlos; GONZALEZ- RAMBILA, Claudia N; MATSUMOTO, Yasuhiro. "Systematic analysis of factors affecting solar pv deployment". Journal of Energy Storage, Elsevier, v. 6, p. 163–172, 2016.

PEREIRA, Enicio Bueno et al. Atlas brasileiro de energia solar. INPE, 2006. v. 1.

PINTO, Julian TM; AMARAL, Karen J; JANISSEK, Paulo R. "Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing". Solar Energy, Elsevier, v. 133, p. 73–84, 2016.

REIS, Lineu Belico dos. Geração de energia elétrica. Barueri: Editora Manole, 2011.

REN21, "Global status report Renewable 2017". REN21, Paris, Tech. Rep, 2017.

RODRÍGUEZ, Carlos Roberto Cervantes. Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação (Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2002.

SECUNDES, Urbano Uelligton. Procedimentos e normativas para instalação de centrais fotovoltaicas conectadas à rede elétrica em média tensão. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2015.

SHIMURA (2016) SHIMURA, Sergio et al. "Production costs estimation in photovoltaic power plants using reliability." Solar Energy, Elsevier, p. 294–304, 2016.

SILVA, Helder Henri; MOISÉS, Antonio Luiz Silva. "Geração fotovoltaica distribuída: Estudo de caso para consumidores residenciais de Salvador-BA". Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 5, n. 1, p. 164 – 180, Salvador, BA, Brasil, 2016.

VARELA, Gustavo Hellstrom. "Medição e avaliação dos dados solarimétricos. " Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, v. 10, n. 1, Salvador, BA, Brasil, 2007.

WANG, Xiaoting et al. "The value of module efficiency in lowering the levelized cost of energy of photovoltaic systems." Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 15, n. 9, p. 4248–4254, 2011.

WWF, Brasil. Mecanismos de suporte para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira: modelo e sugestão para uma transição acelerada, Supernova Design. Brasília, 2015.

Authors Profiles:

Thiago Caldas became a master in 2017 by the SENAI CIMATEC university center in Salvador, Bahia state. He is currently an electrical system operator for the São Francisco hydroelectric company - CHESF and professor of the technical courses of the SENAI network. His research interests are in the areas of energy systems, renewable energy with an emphasis on photovoltaic generation.

Alex Santos has received a D.Sc. from the Federal University of Bahia – Brasil, Salvador in 2010. Is now a Vice-Provost of Research and Graduate Educations and Professor at the SENAI CIMATEC University Center. Her research interests are in the areas of Combustion, Renewable Energy, Energy Efficiency and Maintenance Management.

Evaluación energética de un edificio para el cálculo de un sistema fotovoltaico

Gilberto de Jesús López Canteñs
alelopez10@hotmail.com
Universidad Autónoma Chapingo, Mexico

Bonifacio Gaona Ponce
bgaonap@hotmail.com
Universidad Autónoma Chapingo, Mexico

Francisco Muñoz Gómez
franciscomg53@yahoo.com.mx
Universidad Autónoma Chapingo, Mexico

Noel Chávez Aguilera
noelcha1@yahoo.com.mx
Universidad Autónoma Chapingo, Mexico

Juan Carlos Olguín Rojas
juancarlosuam@hotmail.com
Universidad Autónoma Chapingo, Mexico

Resumen:
En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos al realizar la evaluación energética de un edificio de la Universidad Autónoma Chapingo. Para llevarla a cabo, se utilizó un analizador de calidad en potencia eléctrica, marca Fluke, modelo 435. Con este equipo se determinaron los parámetros de voltaje, intensidad de corriente, potencia real, potencia aparente, potencia reactiva y factor de potencia, los cuales sirvieron de base para realizar los cálculos necesarios en el diseño de un sistema fotovoltaico suficiente para cubrir las necesidades energéticas del edificio. Los resultados de la evaluación indicaron con precisión la energía consumida a través del tiempo, por lo tanto, fue posible determinar, con base en ese comportamiento los periodos de mayor consumo de energía eléctrica. El sistema fotovoltaico propuesto es de tipo mixto, con interconexión a la red eléctrica y con un sistema de respaldo con capacidad para mantener en funcionamiento el sistema eléctrico de la instalación, hasta por cinco horas.

Palabras-clave: Energías renovables, potencia eléctrica, eficiencia energética.

Abstract:
In the present work, the results obtained when performing the energy evaluation of a building of the Autonomous University of Chapingo are shown. To carry it out, a quality electric power analyzer, brand Fluke, model 435 was used. With this equipment the parameters of voltage, current intensity, real power, apparent power, reactive power and power factor were determined, which they served as a basis to carry out the necessary calculations in the design of a sufficient photovoltaic system to cover the energy needs of the building. The results of the evaluation accurately indicated the energy consumed over time, therefore, it was possible to determine,

based on that behavior, the periods of greatest electric power consumption. The proposed photovoltaic system is of mixed type, with interconnection to the electrical network and with a backup system with capacity to keep the electrical system of the installation in operation, for up to five hours.

Keywords: Renewable energies, electric power, energy efficiency.

1 Introducción

Según informes de Greenpeace, la energía fotovoltaica podrá suministrar electricidad a dos tercios de la población mundial en 2030 (GREENPEACE, 2008). Y según un estudio publicado en 2007 por el Consejo Mundial de Energía, para el año 2100 el 70 % de la energía consumida será de origen solar (World Energy Council, 2007).

Los paneles fotovoltaicos constituyen uno de los métodos más simples que actualmente se usan para transformar la energía del sol en energía eléctrica sin dañar al medio ambiente. Por tal motivo se considera una de las fuentes alternas de energía más importantes.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica son una alternativa prometedora en el futuro de las energías renovables.

La energía solar fotovoltaica está indicada para un amplio abanico de aplicaciones donde se necesita generar la electricidad, bien sea para satisfacer las necesidades energéticas de aquellos que no disponen de la red eléctrica o bien para generar energía a la red eléctrica (Alonso, 2008). Desde el punto de vista energético son eficientes, porque generan electricidad en el mismo lugar que se consume, atenuando significativamente las pérdidas por distribución (Liomnis, et al, 2016).

Actualmente, el Centro de Educación Continua (CEC) de la Universidad Autónoma Chapingo tiene un consumo energético de 63 kW/día, considerado como alto, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo diseñar un módulo formado por un sistema de captación de energía solar eléctrica tipo interconectado mixto. Con este módulo se pretende satisfacer el 100% de las necesidades de consumo de energía eléctrica de las instalaciones del CEC y al mismo tiempo disponer de los medios que apoyen la capacitación sobre el uso de sistemas fotovoltaicos que oferta el CEC.

2 Materiales y Métodos

El trabajo de investigación se realizó en las instalaciones del Centro de Educación Continua, ubicada en la Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México- Texcoco km 38.5, Edo. de México. (Figura 1).

La metodología utilizada para el diagnóstico y posterior diseño del Sistema Fotovoltaico interconectado mixto, se basa en la investigación realizada por García y Mendoza (2016), es la siguiente:

1. Identificación de las actividades que se realizan en el CEC y cuáles son los componentes que generan un consumo energético.
2. Reconocimiento de las instalaciones eléctricas e identificación de las líneas principales y su tipo de carga.

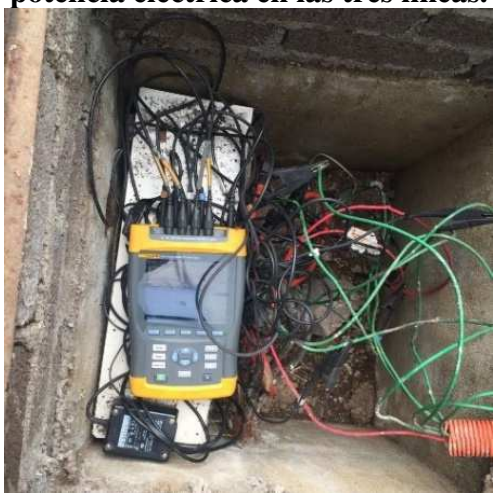
Figura 1: Instalaciones del CEC.

3. Instalación del analizador de calidad de potencia eléctrica, marca FLUKE modelo 435, (Figura 2) y obtención de los parámetros eléctricos (voltaje, intensidad de corriente potencia real, potencia reactiva y factor de potencia). Además, se utilizaron multímetros. Los datos de los parámetros eléctricos se midieron durante una semana normal de actividades laborales.
4. Análisis del comportamiento del voltaje, intensidad de corriente, potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva y factor de potencia de cada una de las tres líneas medidas.
5. Calculo de la potencia real promedio y potencia reactiva promedio de cada una de las líneas, así como la potencia aparente real, mediante la siguiente ecuación (Barcells, 2016):

$$S_T = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{1}$$

donde: S_T = Potencia aparente (VA), Q = Potencia reactiva (VAR), P = Potencia Activa (W).

Figura 2: Conexión del analizador de calidad de potencia eléctrica en las tres líneas.



Diseño del sistema fotovoltaico interconectado mixto para el CEC (Calculó del número de paneles y su inclinación, el número de baterías, el inversor y control de carga y el calibre de los conductores). El diseño propuesto se muestra en la Figura 3 y los elementos que lo forman se calcularon utilizando las siguientes ecuaciones:

Número de Paneles (NP, adimensional)

$$NP = \frac{S_T}{(P_{panel})(horas\ aprov./día)} \tag{2}$$

$$Inclinación = Latitud \pm 10° \tag{3}$$

Donde: Ppanel = Potencia del panel (250 W/panel), horas aprov./día = Horas aprovechables por día (h/día)

Número de Baterías (NB, adimensional)

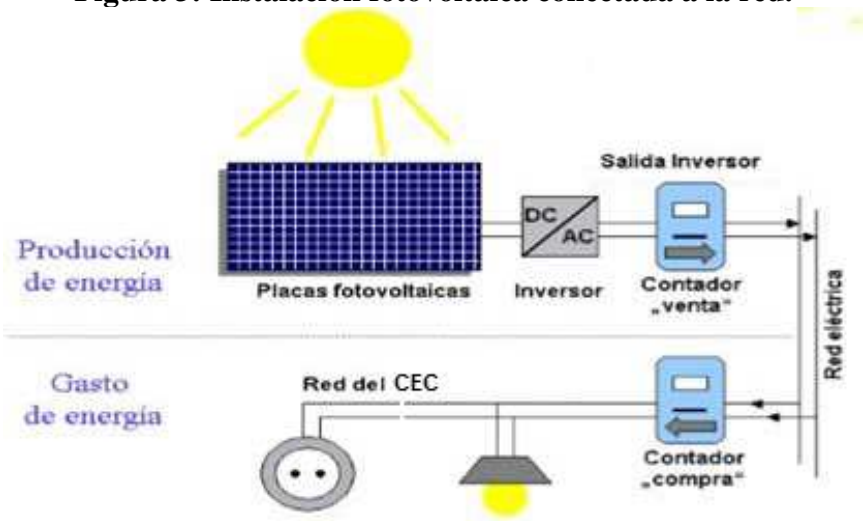
$$P_{diaria/panel} = P_{panel} * 5.5\ h/día \tag{4}$$

$$P_{bateria} = V_{bateria} * Ah_{bateria} \tag{5}$$

$$NB = (P_{\frac{diaria}{panel}} * NP)/P_{batería} \tag{6}$$

Donde: Pdiaria/panel = Potencia diaria del panel (W/día), Pbatería = Potencia de la batería (W), Vbatería = Voltaje de la batería (12 V), Ahbatería = Capacidad de la batería (Ah).

Figura 3: Instalación fotovoltaica conectada a la red.



Inversor y control de carga (C, A)

$$C = \frac{No.\,de\ paneles * P_{panel}}{Voltaje\ del\ control\ de\ carga} \tag{7}$$

Calibre de los conductores

$$I = 1.10(NP * I_{cc}) \tag{8}$$

$$V_{1-2} = (Dif\ de\ tensión\ de\ trabajo) * (V_{TBaterias}) \tag{9}$$

$$S = 2(\frac{L * I}{k * V_{1-2}}) \tag{10}$$

Donde: I = Intensidad máxima del sistema fotovoltaico (A), Icc = Intensidad por corto circuito de un panel (8.75 A), V1-2 = Caída de voltaje (V) Dif. de tensión de trabajo = Diferencia de tensión de trabajo entre el panel fotovoltaico y el regulador (3 %), VTBaterías = Voltaje total de las baterías (NB*Vbatería) (V), S = Sección del cable conductor (mm), L = Longitud del conductor (m), k = Material del conductor y su conductividad (cobre, 56 m/ohm.mm^2).

3 Resultados y Discusión

3.1 Potencia instalada

El inventario de los componentes de consumo de energía del CEC se muestran en la Tabla 1.

La potencia total instalada en el CEC a partir de los dispositivos conectados diariamente a la red eléctrica es de 20330 W.

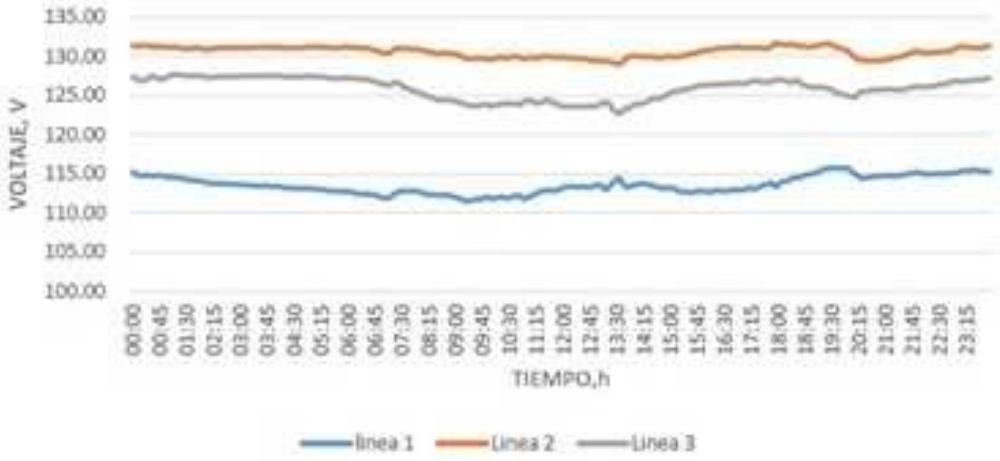
Tabla 1. Consumo energético del CEC por unidad instalada.

Áreas del CEC	Consumo energético (W) por unidad					
	Luminarias		Computadora	Impresora	Proyector	Cafetera
	250 W	70 W	120 W	150 W	250 W	600 W
Estacionamiento	5	5				
Cercas	6	4				
Jardín		6				
Planta baja		38	30	7	4	2
Planta alta		34	12	5	5	2
Subtotal	**2750**	**6090**	**5040**	**1800**	**2250**	**2400**

3.2 Parámetros eléctricos de la instalación

A partir de las mediciones realizadas a las tres líneas que suministran corriente eléctrica al CEC, se obtuvo el comportamiento diario promedio del voltaje (Figura 4) y la intensidad (Figuras 5).

Figura 4: Comportamiento del voltaje vs tiempo.



El voltaje medido en las tres líneas muestra que no están equilibradas, puede deberse a la distancia que existe entre la subestación y la acometida del edificio del CEC o a la falta de mantenimiento en la subestación. En especial la línea 1 se observa con menor tensión que las demás.

La intensidad de corriente promedio medida durante 24 horas muestra un desequilibrio de cargas eléctricas en las tres líneas, la línea 1 y 3 están más descargadas que la línea 2. Además, ocurren fluctuaciones entre las líneas debido a la entrada y salida del personal, correspondiente a la jornada laboral de 9:00 a 15:00 horas, aproximadamente.

En la Figura 6 y 7 se muestra el comportamiento de la potencia real y la potencia reactiva, respectivamente.

Figura 5: Comportamiento de la intensidad de corriente vs tiempo.

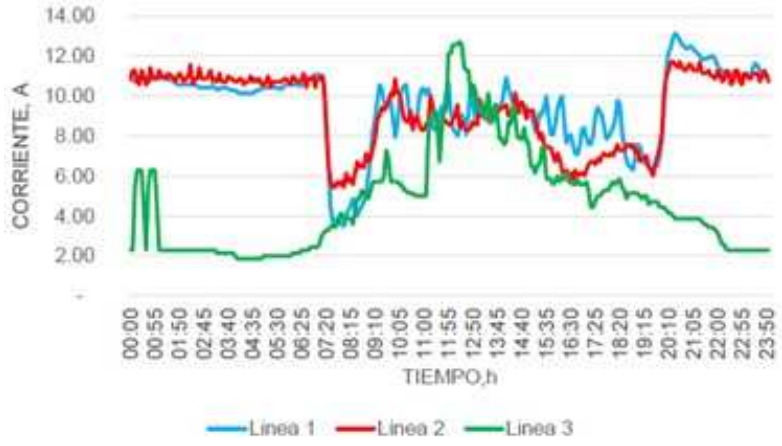


Figura 6: Comportamiento de la potencia real promedio vs tiempo.

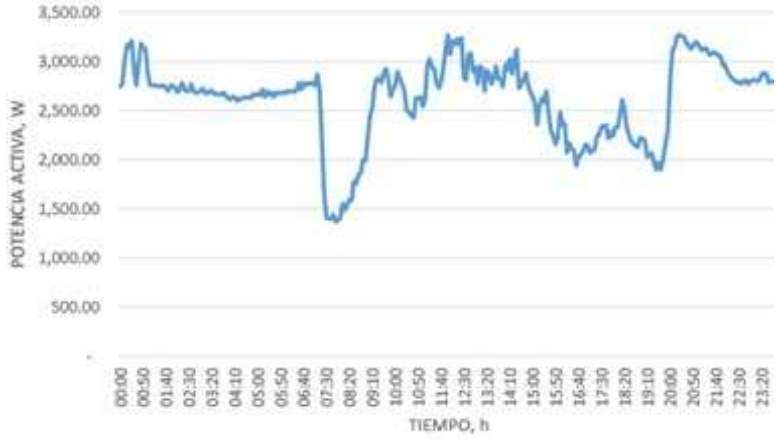


Figura 7: Comportamiento de la potencia reactiva vs tiempo.

En la Figura 6 se observa que durante la noche (de 20:00 a 7:00 horas) la potencia real es constante debido a que se mantienen encendidas las luminarias de la instalación, del jardín, del estacionamiento y de las cercas. En el transcurso del día el consumo es mayor, debido a que en ese periodo se desarrolla la jornada laboral.

En la Figura 7 se observa que en la línea 1 no hay gran variación en el consumo eléctrico, manteniéndose casi constante el comportamiento de la potencia reactiva. Mientras que en la línea 2 baja el consumo de 7:30 a 19:30 horas, debido a que están conectadas las luminarias que funcionan únicamente durante la noche. En cambio, de 19:30 a 7:30 horas aproximadamente, se observa que el comportamiento del consumo eléctrico aumenta, debido a que en ese periodo es cuando entran en funcionamiento las luminarias mencionadas.

En la línea 3 se puede observar que el consumo eléctrico, en el periodo de 11:15 a 17:15 horas, aumenta, esto se debe a que entran en funcionamiento los equipos eléctricos para el desarrollo de las actividades laborales.

Para el cálculo de la potencia activa y la reactiva de cada una de las líneas, se utilizó un total de 2019 datos, medidos cada 5 minutos, obteniéndose como resultado los valores que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Potencia real y potencia reactiva promedio.

— **Potencia (W)**	— **Línea 1**	— **Línea 2**	— **Línea 3**
— **Real**	— 1016.71	— 1101.29	— 507.14
— Total		— 2625.14	
— **Reactiva**	— 50.17	— 219.43	— 110.31
— Total		— 379.92	

A partir de las potencias promedio se calculó la potencia aparente, que fue de 63.65 kW/día.

En la Figura 8 se muestra el comportamiento del factor de potencia en las tres líneas, el cual se encuentra muy cercanos a 1.

3.3 Sistema fotovoltaico interconectado

Con la información de la Estación meteorológica (período 2006-2016) ubicada en la Universidad Autónoma Chapingo con Latitud 19°30’ N, Longitud 98°52’ W y con una altitud de 2241 m, se obtuvo un promedio de 7.2 horas de sol aprovechables.

A partir de los parámetros de potencia aparente y las horas de sol aprovechables se determinó que se requieren 36 paneles solares. Y considerando la latitud del CEC que es de 19°30’ N, deben instalarse los paneles solares con una inclinación entre 9.47 y 29.47°.

Figura 8: Comportamiento del factor de potencia vs tiempo.

El sistema fotovoltaico interconectado diseñado es mixto porque incluye baterías para suministrar electricidad a la instalación en caso de que ocurriese una falla eléctrica por la empresa suministradora (Comisión Federal de Electricidad, México) y la radiación solar presente no sea suficiente para generar electricidad.

A partir de la potencia diaria del panel y la de la batería que fueron 1800 W/día y 1380 W, respectivamente, se determinó que se requieren 47 baterías.

Para un sistema aislado-interconectado, se hace necesario evaluar la potencia total máxima que tendrá que conectarse al inversor, lo que significa que hay que utilizar un inversor cuya potencia nominal sea superior a la potencia demandada por el CEC; en general, los inversores deben de tener capacidad para mayor potencia que la nominal durante ciertos intervalos de tiempo, lo que se denomina capacidad de sobrecarga. (Méndez y Cuervo, 2011). Tomando en cuenta lo anterior, se necesitará un inversor con una potencia mayor a 63.65 kW.

Por lo tanto, se requiere un control de carga 440 A y 12 V, este controlador servirá para no sobrecargar las baterías y evitar una descarga total de las mismas.

Para la conexión de los diferentes dispositivos que forman el sistema fotovoltaico se requiere un conductor calibre AWG # 8.

4 Conclusiones

De acuerdo a la evaluación energética de las instalaciones del CEC el consumo energético es de 63.65 kW/día, obtenida a partir de los datos de potencia activa y reactiva.

Se identificó que durante el mediodía y parte de la noche hay mayor demanda energética, y para satisfacer esa necesidad de consumo energético es necesario un sistema fotovoltaico interconectado mixto que tenga los siguientes componentes: 36 paneles de 250 W, 10 baterías

de 12 V y 115 Ah para tener una reserva de 5 horas, un inversor trifásico que soporte una potencia mayor a 65 kW y un control de carga con capacidad de 440 A y 12 V.

5 References

Alonso A. M. (2008). Sistemas Fotovoltaicos. CIEMAT. Madrid.

Balcells, J. (2016). Eficiencia en el uso de la energía. Alfaomega. Barcelona.

García, A. y Mendoza, J.C. (2016). Evaluación energética del CEC para el cálculo de un sistema fotovoltaico. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica Agrícola. Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. 69 pp.

GREENPEACE. (2010). La energía solar puede dar electricidad limpia a más de 4.000 millones de personas para 2030. Recuperado el 13 de septiembre de 2016, en: http://www.greenpeace.org/espana/es/news/2010/November/la-energ-a-solar-puede-dar-ele/.

Liomnis, L. y Montero, R. (2016). Análisis energético de un sistema fotovoltaico integrado a una cubierta plana horizontal. Ingeniería Energética. XXXVII(1):45-50.

Méndez, J. y Cuervo, R. (2011). Energía Solar Fotovoltaica. 7a edición, Fundación Confemental. Madrid.

World Energy Council. (2007). XXI Survey of Energy Resources. World Energy Council. United Kingdom.

Authors Profiles:

Gilberto de Jesús López obtuvo el grado de doctor en la Universidad Autónoma Chapingo, México, en 2007. Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Es integrante del área académica en ciencias básicas y el tema de investigación principal está relacionado con el campo de la agricultura de precisión.

Bonifacio Gaona obtuvo el título de ingeniero mecánico agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo, México, en 1997. Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Es integrante del área académica en ciencias básicas y el tema de investigación principal es las energías renovables.

Francisco Muñoz obtuvo el título de ingeniero mecánico electricista en la Universidad Nacional Autónoma de México, México, en 1987. Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Es integrante del área académica en ingeniería aplicada y el tema de investigación principal es el diseño de máquinas y el mantenimiento.

Noel Chávez obtuvo el grado de doctor en la Universidad Politécnica de Valencia, España, en 2016. Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Es integrante del área académica en ingeniería aplicada y el tema de investigación principal es el suelo y la maquinaria agrícola.

Juan Carlos Olguín obtuvo el grado de maestría Universidad Nacional Autónoma de México, México, en 2009. Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Es integrante del área académica en ciencias básicas y el tema de investigación principal es control inteligente.

Utilização de energia solar fotovoltaica para carregamento de veículos elétricos

Leandro Henrique Pinto Dantas
leandro.henrique@ua.pt
Universidade de Aveiro, Portugal

Fernando Neto da Silva
fneto@ua.pt
Universidade de Aveiro, Portugal

José Paulo Oliveira Santos
jps@ua.pt
Universidade de Aveiro, Portugal

Resumo:
O presente trabalho avalia o potencial de utilização de energia elétrica de natureza fotovoltaica para satisfação de diferentes tipos de consumo, em particular o carregamento de veículos elétricos. A partir de um campo fotovoltaico disponível na cobertura das instalações de uma empresa de serviços, foi efetuada a avaliação técnico-económica da utilização da energia elétrica produzida para satisfação simultânea quer das necessidades energéticas do próprio edifício, quer das necessidades de carregamento de veículos elétricos da frota da empresa. Foram analisados os requisitos técnicos necessários atendendo quer às cargas do edifício, quer à natureza dos carregadores de veículos elétricos e utilizado o software de simulação Homer Legacy para determinar o custo da energia, a fração de energia renovável utilizada, os indicadores económicos do projeto e as emissões evitadas para diferentes cenários.
Comparativamente a uma situação em que toda a energia elétrica é adquirida ao distribuidor, a redução do consumo de energia da rede chegou a atingir os 85%. Os resultados mostram ainda que o potencial máximo do sistema é obtido quando se privilegia a associação dos consumos do edifício ao sistema de carregamento, desde que estabelecida uma agenda de carregamento dos veículos elétricos coincidente com a maior disponibilidade do recurso solar.

Palavras-chave: carregamento de veículos elétricos, energia fotovoltaica.

Abstract:
This work evaluates the potential of electric photovoltaic energy system applied to satisfy different types of consumption, in particular those related with charging of electric vehicles. From a photovoltaic field available in the facility's rooftop of a service company, a technical-economic evaluation was made based on the electric energy produced which could simultaneously satisfy both the energy needs of the building itself and the company's fleet electric vehicles charging needs. The used approach identified technical requirements, taking into account both building loads and the nature of electric vehicle chargers. The Homer Legacy simulation software was used to determine the cost of energy, the fraction of renewable energy used and emissions avoided for different scenarios.

Compared to a situation in which all the electric energy is acquired from the grid, the reduction of the network's energy consumption reached 85%. The results also show that the maximum potential of the system is obtained when the association of the building consumptions with the charging system is favored and an electric vehicle charging schedule is established taking into account the greater availability of the solar resource.

Keywords: electric vehicles charging, photovoltaic system.

1 Introdução

No âmbito do presente trabalho é analisada a Geração Fotovoltaica Integrada em Edifícios – BIPV (Building Integrated Photovoltaics) em conjunto com sistemas de carregamento de Veículos Elétricos (VE) maximizando-se a utilização de um Sistema de Geração Solar Fotovoltaica (PV) para redução dos consumos a partir da Rede Elétrica de Serviço Público (RESP) durante o carregamento de VE. A instalação é classificada como uma Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) de acordo com as especificações e legislação para os sistemas fotovoltaicos. A aplicação de sistemas PV a VE, tem como motivação a possibilidade de reduzir consumos e impactos ambientais localmente. O BIPV baseia-se no consumo de uma unidade fabril com escritório e uma frota de VE, localizada em Aveiro, Portugal.

O objetivo do trabalho é o de dimensionar, instalar o PV e utilizar a energia elétrica gerada no sistema de carregamento dos VE e na satisfação dos consumos do edifício. O excedente gerado pode ser vendido à RESP.

Foi utilizado um simulador de otimização de micro centrais de energia, o software Homer Legacy, qual tem a capacidade de comparar vários sistemas com diferentes características e potências.

Os cálculos levam em conta as diferentes tarifas horárias e o valor de venda da energia excedente.

2 Estudos e tecnologias similares

A Smartflower foi a pioneira a trazer ao mercado uma solução de geração fotovoltaica integrada com inversor e demais itens da instalação, produzindo o “smartflower POP”, uma estrutura baseada na flor “Girassol”. O sistema possui painéis solares fotovoltaicos instalados numa estrutura com rastreamento solar em 2 eixos, podendo alcançar um grau de fornecimento de energia solar de 60%, enquanto uma instalação fixa alcança apenas 30%. A empresa

comercializa também versões com sistemas integrados de bancos de baterias e carregadores de bicicletas elétricas e de VE de até 22 kW. (Smartflower Company (2016), s.d.)

Em agosto de 2016 a ENFORCE, apresentou sua estação de carregamento rápido por sistema fotovoltaico, batizada de InCh, podendo recarregar um VE em 30 minutos (ENFORCE, 2016).

A MAGNUM CAP realiza estudos em sistemas off grid de carregamento em corrente contínua (CC) com banco de baterias que possibilita atenuar as oscilações da intensidade solar.

3 Características técnicas e legais

Segundo o Decreto Lei n.º 153/2014, a potência de ligação à RESP é limitada pela potência contratada. A potência instalada de geração PV pode variar até ao dobro da potência contratada. Os painéis fotovoltaicos geram energia elétrica em CC sendo necessário um inversor de corrente para conversão em Corrente Alternada (CA). O inversor deve depender da onda sinusoidal gerada pela RESP, portanto deve ser um inversor *on-grid*, servindo como proteção da RESP caso haja desligamento proposital da rede, manutenção ou acidentes.

Em Portugal é necessário o Registo Eletrónico da UPAC na Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) pelo SERUP – Sistema Eletrónico de Registos de Unidades de Produção.

Os contadores de consumo energético normais contabilizam a passagem de corrente elétrica mas não identificam em qual sentido, cobrando pela energia consumida e também pela fornecida à RESP. Portanto é necessário um contador bidirecional.

Deve-se solicitar a inspeção após o processo de registo e instalação do sistema. É cobrada uma Taxa de Registo qual inclui a primeira inspeção. A taxa estipulada para a faixa de geração de energia entre 5 kW e 100 kW é de 250€, com injeção de energia na RESP ou 175€ para geração sem injeção de energia na RESP. Aprovada a inspeção é emitido o Certificado de Exploração, necessário para o contrato com o operador local da RESP o qual cobrirá o fornecimento e remuneração pela energia fornecida à RESP.

O Decreto-lei define a remuneração da energia fornecida à RESP, a qual é baseada nos preços do Operador do Mercado Ibérico Energético (OMIE) para Portugal.

Os cálculos de remuneração são diferentes para cada tipo de Unidade Produtora (UP), tendo uma UPAC uma remuneração diferente de uma Unidade de Pequena Produção (UPP) a qual é calculada de acordo com:

$$R_{UPAC,m} = E_{fornecida,m} \times OMIE_m \times 0{,}9 \quad (1)$$

Sendo:

$R_{UPAC,m}$ - Renumeração no mês em €;

$E_{fornecida,m}$ - Energia fornecida no mês em kWh;

$OMIE_m$ - Média aritmética simples do preço de fecho do OMIE no mês em €/kWh;

0,9 - Redução de 10% do valor da energia, desincentivando o sobredimensionamento.

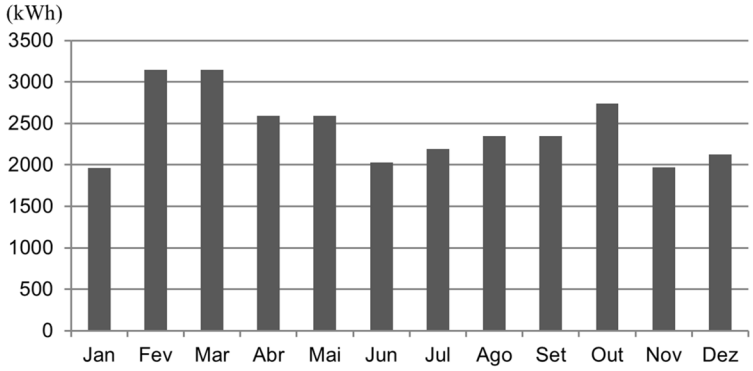
4 Modelação, dimensionamento e simulação

As necessidades da empresa foram contabilizadas pelos consumidores ativos, faturas anteriores, consumos atuais e características locais. Também foi realizada previsão dos consumos. O Homer necessita dos dados geográficos da instalação, dos consumos horários para o período de 1 ano, das potências e custos comerciais dos equipamentos.

4.1 RESP e Consumos

Os dados de consumo do edifico foram obtidos com o sistema Engage da Efergy nos meses de outubro a dezembro de 2015 e foram extrapolados os consumos anuais com base em faturas do ano anterior, gerando um mapa anual de consumo (Figura 1).

Figura 1: Consumo mensal



4.2 Cenários de Consumo

Para visualizar o impacto dos VE no consumo e o impacto da geração fotovoltaica nas reduções de consumo à RESP, foram gerados três cenários:

- Consumo do Edifício: somente os consumos do escritório e da linha de produção.
- Consumo para a carga dos Veículos Elétricos: somente o consumo dos VE.
- Consumo Total: consumo do Edifício e dos VE.

Salienta-se que o Consumo Total não é uma soma simples, já que a simulação considera os horários de consumo e de geração solar.

4.3 Inversor

O inversor é o meio de conexão entre o PV e a rede elétrica do edifício. Sua tarefa consiste em converter o sinal elétrico de CC do PV num sinal elétrico de CA e ajustá-lo para a frequência e para o nível de tensão da rede a que está ligado. A conversão de corrente envolve perdas relativamente pequenas. Existem dois tipos de inversores, os conectáveis à rede (*on-grid*) e os autónomos (*off-grid*). Os inversores *on-grid* necessitam da excitação e frequência da rede. (Portal Energia - Instituto Superior Técnico, janeiro de 2004)

A potência é limitada pela potência contratada do edifício e pela sequência de ligação dos painéis tendo sido selecionada a família de inversores TRIO da ABB.

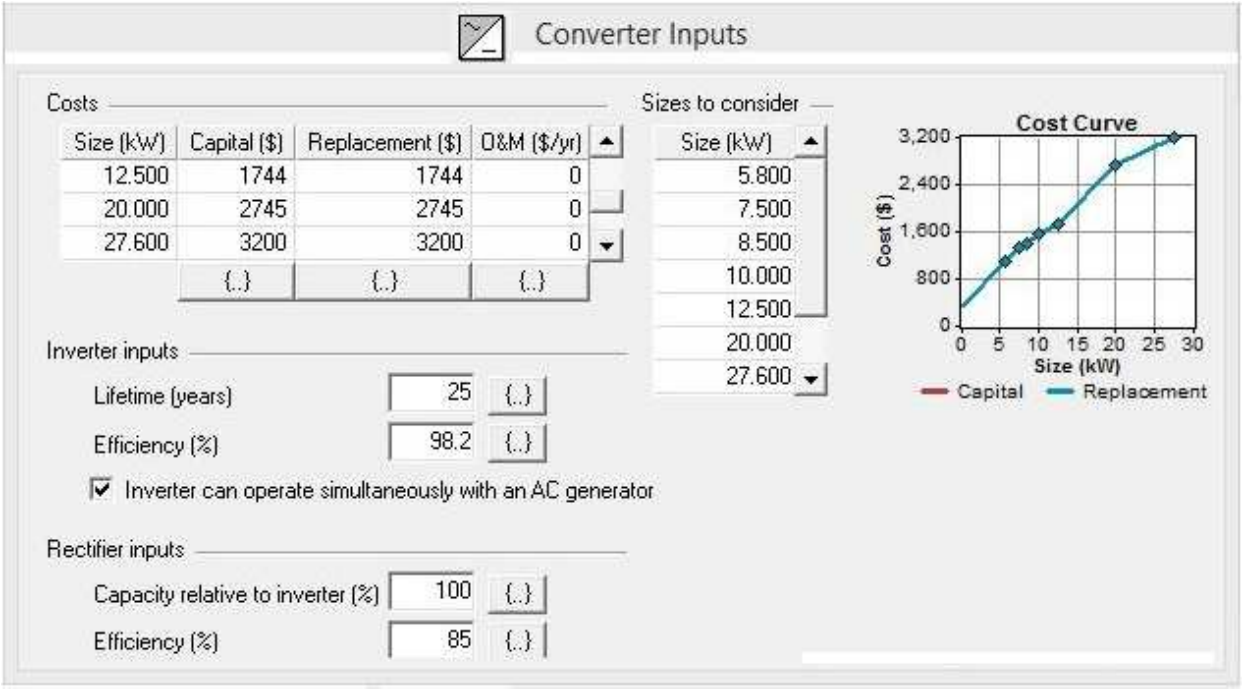
Nos "Custos do equipamento" (*Costs*) foram utilizadas diferentes potências e custos (Tabela 1).

A ABB garante que os equipamentos possuem as mesmas características durante 25 anos, sendo este o período de vida útil do equipamento. A eficiência do equipamento é de 98,2% encontrando-se as características técnicas dos diferentes tipos de inversor descritas na figura 2.

Tabela 1 – Custos dos inversores (€)

Valores comerciais dos Inversores (€)			
Potência Nominal	Sem IVA	Com IVA	Custo unitário por kW (Com IVA)
5.8 kW	1.115,90	1.394,87	240,50
7.5 kW	1.345,64	1.682,05	224,27
8.5 kW	1.412,92	1.766,15	207,78
10 kW	1.558,97	1.948,72	194,87
12.5 kW	1.743,59	2.179,49	174,36
20 kW	2.744,62	3.430,77	171,54
27.6 kW	3.200,00	4.000,00	138,89

Figura 2 – Carcaterísticas dos Inversores



4.4 Parque Fotovoltaico

Foi escolhido, para simulação e aquisição, o Painel Fotovoltaico com as seguintes características técnicas (Lightway Green New Energy Co.,Ltd., 2016):

Fabricante: *Lightway Green New Energy* – China;
Modelo: Lightway Solar – LW-240-29b;
Potência unitária: 240 W;
Tensão de circuito aberto (Voc): 37,4 V
Corrente máxima (Imp): 8,11 A
Corrente de curto circuito (Isc): 8,56 A

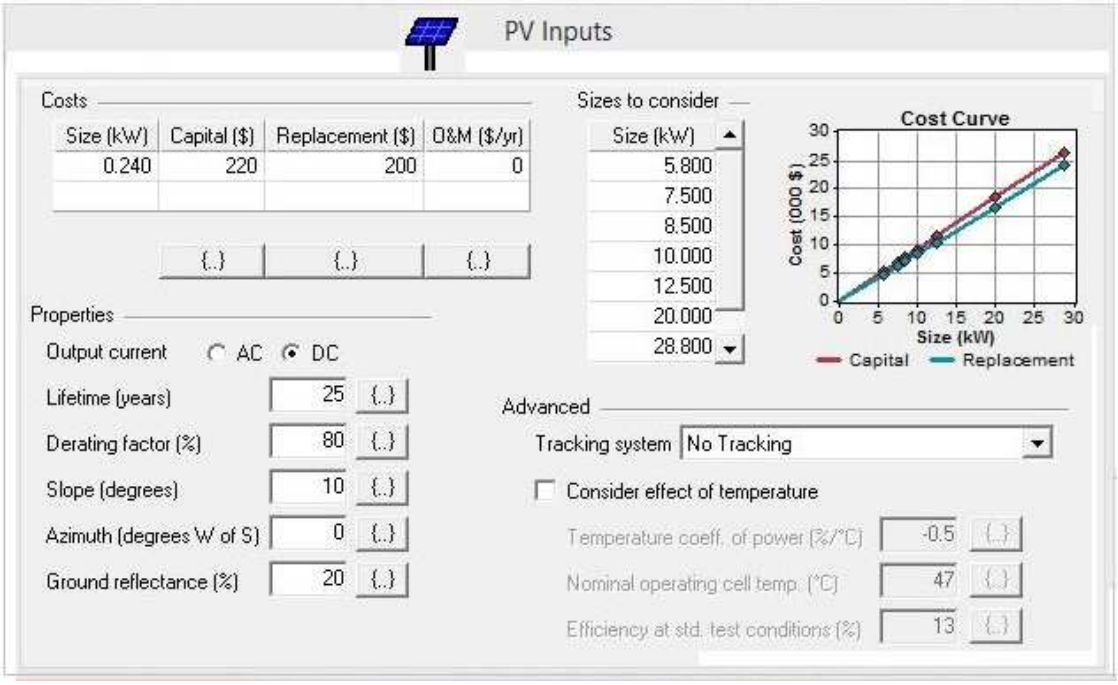
O simulador requere a especificação da potência unitária dos painéis e das potências necessárias no sistema. A forma de instalação com ligações em série e paralelo deve ser feita manualmente ou por outro sistema simulador qual utilize as demais especificações técnicas.

Assumiu-se um custo de 220€ para uma potência de 240 W incluindo painel e instalação. No campo "Dimensionamento a Considerar" (*Sizes to consider*) foram introduzidas as potências para avaliação económica.

A "Curva de Custo" do equipamento (*Cost Curve*) é automaticamente calculada em função da potência. Neste caso o valor varia linearmente.

Foi também especificado o tipo de corrente de saída do PV, a vida útil do sistema PVe o grau de inclinação da instalação. Os dados do PV estão sumariados na Figura 3.

Figura 3 – Características do PV



4.5 RESP - Rede

As tarifas e custos de energia foram obtidos nas faturas de 2015 e estão divididos em três escalões: Ponta, Cheia e Vazio (Tabela 2). A sua distribuição horária está disponível na tabela 3.

Tabela 2 – RESP, taxas e custo energético (€)

Custos com a RESP e Taxas em Euros (€)	
Potência Contratada / ano	443,00
Taxas pela UPAC / 1º ano	250,00
Energia em Ponta / kWh	0,2753
Energia em Cheia / kWh	0,1398
Energia em Vazio / kWh	0,0695

Tabela 3 – Ciclo horário diário para BTE e BTN

Ciclo diário para BTE e BTN em Portugal Continental			
Período de hora legal de Inverno		**Período de hora legal de Verão**	
Ponta:	09.00/10.30 h 18.00/20.30 h	Ponta:	10.30/13.00 h 19.30/21.00 h
Cheias:	08.00/09.00 h 10.30/18.00 h 20.30/22.00 h	Cheias:	08.00/10.30 h 13.00/19.30 h 21.00/22.00 h
Vazio normal:	06.00/08.00 h 22.00/02.00 h	Vazio normal:	06.00/08.00 h 22.00/02.00 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h

(ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, 2009)

4.5.1 Remuneração da eletricidade fornecida à RESP

Os valores médios mensais dos preços de energia elétrica em 2015, especificados pela OMIE (OMI-Polo Español S.A. (OMIE), 2016), são apresentados na tabela 4.

Para obter um calendário de tarifação horária foi necessário associar as tarifas de consumo e de venda, as quais são diferentes em cada mês, com treze tarifas, sendo seis para o horário de Ponta, seis para o de Cheia e uma para o Vazio (Figura 4). Os dados de emissões de poluentes da RESP foram obtidos por publicação da ERSE para 2014, ano anterior à simulação.

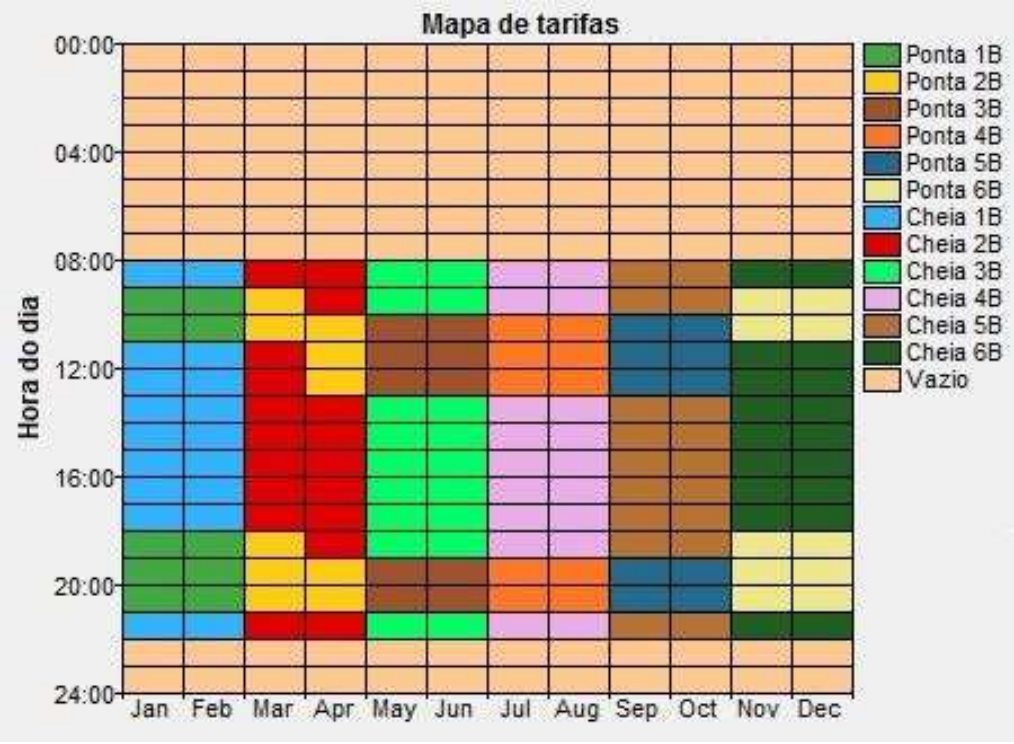
4.5.2 Potência Contratada

Os custos com a Potência Contratada foram aplicados como taxa de *Standby Charge*, que é um valor fixo e anual para que a rede esteja conectada ao sistema gerador. Para manter a Potência Contratada na simulação sem a geração fotovoltaica, foi necessário manter o sistema (PV) e o in versor com a menor potência possível do simulador, que são 10 W e custo zero nos equipamentos.

Tabela 4 – Preço médio OMIE para Portugal em 2015

Preço médio OMIE (sem IVA)			
Mês	(€ / MWh)	por bimestre (EUR/kWh)	*0,9 (EUR/kWh)
Janeiro	67,17	0,0630	0,0567
Fevereiro	58,75		
Março	56,74	0,0581	0,0523
Abril	59,50		
Maio	58,05	0,0625	0,0563
Junho	67,00		
Julho	72,52	0,0688	0,0620
Agosto	65,16		
Setembro	61,09	0,0607	0,0546
Outubro	60,30		
Novembro	62,11	0,0629	0,0566
Dezembro	63,70		

Figura 4 – Mapa tarifário



O uso do *Standby Charge* (€/ano) foi necessário para contabilizar o custo da potência contratada do sistema e substituir o *Demand Rate* (€/kW/mês) que contabiliza os picos de potência consumida.

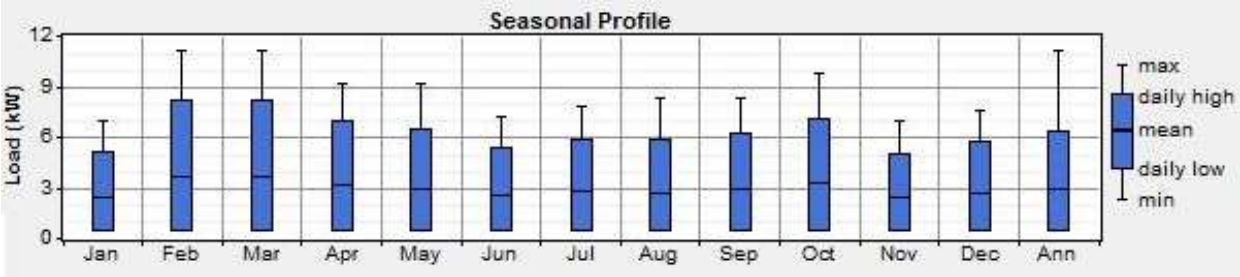
Portugal não utiliza o sistema *Demand Rate* mas sim a "Potência Contratada" que é um valor monetário fixo pela Potência Máxima nominal do sistema por dia.

4.5.3 Cargas e Consumos

Os consumos foram simulados para diferentes pontos da instalação com referência aos consumos totais do edifício, incluindo escritórios, produção e carregamento da frota de veículos elétricos da empresa. Cada cenário de consumo teve simulação base sem PV.

Foi gerado um gráfico de consumo, não considerando as cargas dos VE, de forma a perceber qual é o padrão de consumo do edifício (Figura 5.

Figura 5 – Consumo anual com faixa diária e pico de consumo mensal



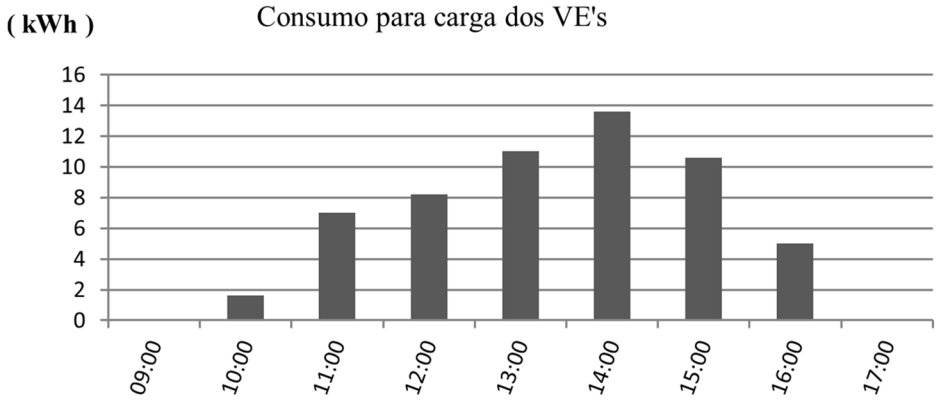
As necessidades energéticas dos VE, geraram uma tabela de consumos e horários médios de carregamento de acordo com a potência de carga (Tabela 5). A potência de carga é diferente para cada veículo, havendo também uma potência mínima para carregamento. Mesmo disponibilizando 22 kW, depende do retificador interno do VE conseguir converter os 22 kW CA/CC. Somente alguns VE, como o ZOE, conseguem converter esta potência.

Tabela 5 – Cargas dos veículos

Análise energética das cargas dos veículos elétricos						
VE	Bateria (kWh)	Consumo médio (kWh/dia)	Potência mínima		Potência máxima	
			kW	Tempo de carga	kW	Tempo de carga
i3	19	16	3.6	4:26	7.4	2:10
ZOE (3PH)	22	15	7	3:08	22	0:40
Leaf	24	8	3.6	2:13	6.6	1:13
C0	16	8	3.6	2:13	7.4	1:05
C0	16	4	3.6	1:06	7.4	0:32
C0	16	6	3.6	1:40	7.4	0:50

Foi possível gerar um padrão de cargas de VE que segue a disponibilidade solar (*Load Balance Solar)*, maximizando-se o aproveitamento desta disponibilidade (Figura 6).

Figura 6 – Caregamento dos VE de acordo com o *Load Balance Solar*



5 Resultados das simulações

Os resultados estão divididos em três perfis de consumo tendo sido considerado em cada perfil a existência ou não do campo PV.

5.1 Cenário 1: Somente edifício, sem PV

O custo de operação anual do sistema é de 4.773,00€ e inclui o custo de 4.330,00€ na compra de energia elétrica e 443,00€ em "potência contratada". No total da vida útil de 25 anos são gastos 61.020,00€. O consumo do edifício é de 25.696 kWh/ano (Tabela 6). A discrepância de 14 kWh/ano deve-se à energia gerada pelo PV de 10 W. As emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE) estão sumariadas na Tabela 7.

Tabela 6 – Resultados: edifício sem sistema solar

HOMER - [MC Somente edificio c sem solar.hmr *]

Simulation Results

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
0.01	0.01	27.6	$ 0	4,773	$ 61,020	0.186	0.00

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Purchases (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge ($)
Jan	1,794	0	1,794	7	289
Feb	2,496	0	2,496	11	407
Mar	2,749	0	2,749	11	448
Apr	2,286	0	2,286	9	398
May	2,214	0	2,214	9	384
Jun	1,837	0	1,837	7	317
Jul	2,048	0	2,048	8	354
Aug	2,026	0	2,026	8	350
Sep	2,090	0	2,090	8	362
Oct	2,421	0	2,421	10	421
Nov	1,724	0	1,724	7	278
Dec	1,997	0	1,997	8	323
Annual	25,682	0	25,682	11	4,330

Tabela 7 – Emissões: edifício sem sistema solar

Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	2,799
Sulfur dioxide	3.85
Nitrogen oxides	4.62

5.2 Cenário 2: Somente edifício, com PV

Foram avaliados os contributos do PV sobre os consumos do edifício e simulado o uso do PV com sete potências entre 5.8 kW e 28.8 kW. Os cinco melhores resultados estão detalhados na Tabela 8.

Tabela 8 – Melhores resultados: edifício com sistema solar

HOMER - [MC Somente edificio c.hmr]

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
28.8	20.0	27.6	$ 29,395	-239	$ 26,343	0.080	0.84
28.8	27.6	27.6	$ 29,850	-273	$ 26,361	0.080	0.84
20.0	12.5	27.6	$ 20,327	758	$ 30,014	0.091	0.74
28.8	12.5	27.6	$ 28,394	130	$ 30,057	0.092	0.84
20.0	20.0	27.6	$ 21,328	693	$ 30,187	0.092	0.74

Os custos de operação anual variam de -273,00€ a 758,00€, dependendo da configuração do sistema. Durante a vida útil são gastos 26.343,00€ para o melhor sistema e 30.187,00€ para o quinto melhor resultado. A melhor escolha é a com menor custo de operação anual (-273,00 €), o que corresponde a uma configuração com PV de 28.8 kW e inversor de 27.6 kW. Neste caso, o consumo é de 25.696 kWh/ano e a geração fotovoltaica permite obter 40.268 kWh/ano. O consumo a partir da RESP cai para 7.545 kWh/ano (Tabela 9) e as emissões de GEE estão representadas na Tabela 10.

Há injeção de energia elétrica na RESP, substituindo a energia produzida por fontes fósseis por energia produzida por fontes renováveis, o que conduz a emissões nulas ou negativas.

5.3 Cenário 3: Somente carga VE, sem PV

Para este caso, os resultados podem ser consultados nas tabelas 11 e 12.

A operação anual do sistema custa 4.285,00€, incluindo 3.842,00€ na compra de 20.792 kWh de energia elétrica e 443,00€ em "potência contratada". Durante a vida útil são gastos 54.775,00€.

Tabela 9 – Resultados: edifício com sistema solar

HOMER - [MC Somente edificio c.hmr]

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
28.8	27.6	27.6	$ 29,850	-273	$ 26,361	0.080	0.84

Simulation Results

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Purchases (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge ($)	Demand Charge ($)
Jan	860	874	-14	7	1	0
Feb	1,073	747	326	11	48	0
Mar	920	1,500	-580	11	-29	0
Apr	469	2,120	-1,651	8	-87	0
May	383	2,683	-2,300	8	-130	0
Jun	218	3,178	-2,960	7	-167	0
Jul	208	3,107	-2,899	5	-179	0
Aug	262	2,786	-2,524	7	-156	0
Sep	486	1,967	-1,481	7	-81	0
Oct	804	980	-175	10	-1	0
Nov	776	862	-86	7	-3	0
Dec	1,086	588	498	8	68	0
Annual	7,545	21,392	-13,847	11	-716	0

Tabela 10 – Emissões: Somente edifício com sistema solar

	Pollutant	Emissions (kg/yr)
Emissions	Carbon dioxide	-1,509
	Sulfur dioxide	-2.08
	Nitrogen oxides	-2.49

Tabela 11 – Resultado: Somente carga dos VE sem PV

HOMER - [MC Somente Load Balance sem solar.hmr]

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
0.01	0.01	27.6	$ 0	4,285	$ 54,775	0.206	0.00

Tabela 12 – Emissões: Somente carga dos VE sem PV

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	2,266
Sulfur dioxide	3.12
Nitrogen oxides	3.74

5.4 Cenário 4: Somente carga VE, com PV

Foram avaliados os contributos do PV nos carregamentos dos VE, com manipulação da carga conforme o *Load Balance Solar*. O Homer foi utilizado para definir quais as melhores configurações de campo PV/inversor a utilizar entre 5.8 kW e 28.8 kW, representado-se os melhores resultados na Tabela 13.

Tabela 13 – Melhores Resultados: Cargas VE com PV

HOMER - [MC Somente Load Balance.hmr]

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
28.8	20.0	27.6	$ 29,395	-554	$ 22,314	0.084	0.93
28.8	27.6	27.6	$ 29,850	-588	$ 22,332	0.084	0.93
20.0	12.5	27.6	$ 20,327	298	$ 24,137	0.091	0.85
20.0	20.0	27.6	$ 21,328	237	$ 24,360	0.092	0.85
20.0	27.6	27.6	$ 21,783	237	$ 24,815	0.093	0.85

Os resultados mostram que os custos anuais de operação anual variam desde -588,00€ a 298,00€, dependendo da configuração do sistema. Durante a vida útil são gastos 22.314,00€ no melhor sistema e 24.815,00€ no quinto melhor resultado. A melhor escolha, com menor custo de operação anual, compreende um campo PV de 28.8 kW e um inversor de 27.6 kW, com custo anual de -588,00 € (tabelas 14 e 15).

Há injeção de energia elétrica produzida por fontes renováveis na RESP, conduzindo a emissões nulas ou negativas.

Tabela 14 – Resultados: Carga VE com sistema solar (*Load Balance Solar*)

HOMER - [MC Somente Load Balance.hmr]

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
28.8	27.6	27.6	$ 29,850	-588	$ 22,332	0.084	0.93

Simulation Results

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Purchases (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge ($)
Jan	544	585	-41	13	4
Feb	316	891	-575	11	-33
Mar	178	1,741	-1,563	13	-82
Apr	94	2,322	-2,228	10	-118
May	116	2,865	-2,748	12	-156
Jun	50	3,139	-3,089	8	-175
Jul	28	3,210	-3,182	6	-196
Aug	74	2,858	-2,784	9	-172
Sep	184	2,047	-1,863	11	-102
Oct	280	1,110	-830	11	-46
Nov	546	647	-101	13	1
Dec	650	383	268	13	43
Annual	3,061	21,798	-18,738	13	-1,031

Tabela 15 – Emissões: Carga dos VE com sistema solar

	Pollutant	Emissions (kg/yr)
Emissions	Carbon dioxide	-2,042
	Sulfur dioxide	-2.81
	Nitrogen oxides	-3.37

5.5 Cenário 5: Consumo total, sem PV

As tabelas 16 e 17 sumariam os resultados obtidos no cenário em que edifício e carregamento de VE's se processam sem recurso solar.

Tabela 16 – Resultado: Consumo total sem sistema solar

HOMER - [MC Somente edificio c sem v2g e com Load Balance sem solar.hmr]

Simulation Results

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
0.01	0.01	27.6	$ 0	8,618	$ 110,162	0.185	0.00

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Purchases (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge ($)
Jan	3,561	0	3,561	21	572
Feb	4,092	0	4,092	25	663
Mar	4,516	0	4,516	25	731
Apr	3,996	0	3,996	23	743
May	3,981	0	3,981	23	741
Jun	3,547	0	3,547	21	662
Jul	3,815	0	3,815	21	711
Aug	3,793	0	3,793	22	707
Sep	3,800	0	3,800	22	708
Oct	4,188	0	4,188	23	778
Nov	3,434	0	3,434	21	552
Dec	3,764	0	3,764	21	606
Annual	46,487	0	46,487	25	8,175

Tabela 17 - Emissões: Consumo total sem sistema solar

Emissions

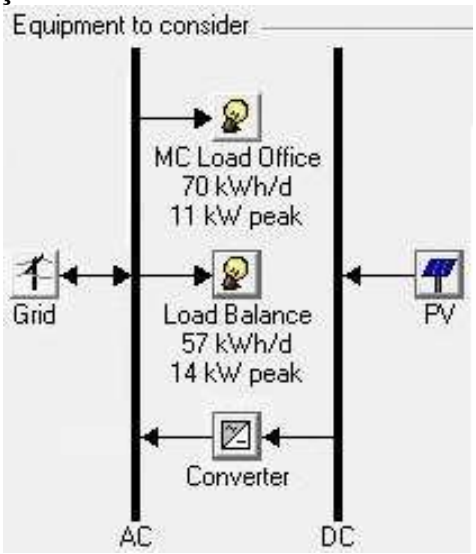
Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	5,067
Sulfur dioxide	6.97
Nitrogen oxides	8.37

A operação anual do sistema custa 8.618,00€ e inclui o custo de 8.175,00€ na compra de 46.487 kWh de energia elétrica e 443,00€ em "potência contratada". Durante a vida útil são gastos 110.162,00€.

5.6 Cenário 6: Consumo total, com PV

Foram avaliados os contributos do PV para o consumo total com uma simulação de potência instalada para o campo PV que poderia oscilar entre 5.8 kW e 28.8 kW tal como se mostra na Figura 7.

Figura 7 – Configuração do sistema: consumo do edifício mais cargas dos VE



Para diferentes potências de PV e inversores, os resultados obtidos estão representados na Tabela 18.

Tabela 18 – Consumo total com sistema solar

HOMER - [MC Somente edificio c sem v2g e com Load Balance.hmr]

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
28.8	27.6	27.6	$ 29,850	1,886	$ 53,954	0.091	0.71
28.8	20.0	27.6	$ 29,395	1,937	$ 54,162	0.091	0.71
28.8	12.5	27.6	$ 28,394	2,877	$ 65,173	0.110	0.67
20.0	20.0	27.6	$ 21,328	3,671	$ 68,262	0.115	0.55
20.0	27.6	27.6	$ 21,783	3,671	$ 68,717	0.116	0.55

Os custos de operação anual variam, de acordo com a potência instalada entre 1.886,00€ e 3.671,00€. Durante a vida útil são gastos 53.954,00€ para o melhor sistema e 68.717,00€ para o quinto melhor resultado. O menor custo de operação anual é obtido com um campo PV de 28.8 kW e um inversor de 27.6 kW tal como se mostra nas tabelas 19 e 20.

Tabela 19 – Resultados: Consumo total com sistema solar

HOMER - [MC Somente edificio c sem v2g e com Load Balance.hmr]

PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.
28.8	27.6	27.6	$ 29,850	1,886	$ 53,954	0.091	0.71

Simulation Results

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Purchases (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge ($)
Jan	1,923	169	1,753	20	267
Feb	2,122	200	1,922	21	303
Mar	1,807	620	1,187	24	172
Apr	994	935	59	20	11
May	853	1,386	-533	20	-30
Jun	492	1,742	-1,250	15	-71
Jul	453	1,585	-1,132	13	-70
Aug	584	1,341	-757	17	-47
Sep	1,069	840	229	19	34
Oct	1,890	298	1,592	20	278
Nov	1,818	194	1,624	20	243
Dec	2,369	104	2,265	21	351
Annual	16,374	9,415	6,958	24	1,443

Tabela 20 – Emissões: Consumo total com sistema solar

Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	758
Sulfur dioxide	1.04
Nitrogen oxides	1.25

6 Análise das Simulações

6.1 Comparação entre Cenários

As simulações comprovaram que o equipamento fotovoltaico com um inversor de 27.6 kW atende às necessidades do edifício possuindo os menores custos anuais. As emissões obtiveram uma queda expressiva, mesmo considerando o mercado energético português que comparado a outros países possui maior percentagem de fontes renováveis na geração de energia elétrica na RESP.

6.1.1 Cenários 1 e 2: Somente edifício, sem e com sistema solar.

O cenário sem sistema solar tem custo anual de 4.773,00€. Na aplicação do PV obteve-se uma redução total da fatura em 9 meses durante um ano, com uma faturação de energia vendida de 700,00€/ano, totalizando 273,00€/ano após deduções de "potência contratada" da RESP.
Os custos anuais com energia elétrica foram anulados, havendo lucros com venda do excedente. Em termos energéticos a empresa consome cerca de 25.700 kWh/ano mas com a instalação do PV passará a consumir da rede 824 kWh/ano gerando um excedente próximo dos 14.000 kWh/ano.
A redução de emissões de dióxido de carbono foi próxima de 3 ton/ano considerando a venda de energia "limpa", que evita a emissão de 1,5 toneladas de CO_2 na geração de energia elétrica do sistema nacional.

6.1.2 Cenários 3 e 4: Carga dos veículos, sem e com sistema solar.

O cenário sem sistema solar tem custo anual de 4.285,00€. Na aplicação do PV obteve-se uma redução total da fatura em 9 meses durante um ano, com uma faturação de energia vendida de cerca de 1.000€/ano, totalizando 588,00€/ano após deduções de "potência contratada" da RESP. Os custos anuais foram anulados, havendo ainda lucros com a venda do excedente. O excedente energético do sistema dura 11 meses, sendo necessária a compra de energia somente em dezembro. O custo de compra é maior do que o custo de venda do kWh, mantendo os 9 meses de redução de fatura de energia. Os VE da empresa consomem cerca de 21.000 kWh/ano mas com a instalação do sistema solar passará a consumir da rede 268 kWh/ano. A redução de emissões de dióxido de carbono foi próxima de 2 ton/ano

6.1.3 Cenários 5 e 6: Consumo Total, sem e com sistema solar.

O cenário sem sistema solar tem custo anual de 8.618,00€.
Na aplicação do PV obteve-se uma redução total da fatura em 4 meses durante um ano com um custo anual de 1.886,00€. O excedente energético ocorre no verão. Com a instalação do sistema solar, a empresa passará a ter um consumo líquido de cerca de 7.000 kWh/ano da RESP, com excedente líquido em torno de 3.600 kWh/ano. As emissões de dióxido de carbono de 5 ton/ano (sem PV) foram reduzidas para 750 kg/ano.

6.2 Análise dos Resultados

Nos cenários individuais, "somente edifício" ou "somente carga VE", houve um investimento maior, com reembolso da energia vendida e houve sobredimensionamento do sistema.

No cenário que engloba o consumo total, Edifício mais VE, obtivemos uma menor venda do excedente, porém, um retorno maior do investimento durante a vida útil do projeto. O sobredimensionamento acarreta maiores custos iniciais e venda de energia a valores baixos, aumentando lucros à RESP e não ao investidor. O valor de energia comprada à RESP, no "horário solar" de Ponta é quase 5 vezes superior ao valor pago pelo excedente e no período de Cheia é 2 vezes superior. O melhor retorno do investimento obtém-se com a redução do consumo à RESP e não na venda do excedente. No cenário com consumo total, a melhor escolha é com o inversor de 27.6 kW no custo anual e na vida útil do sistema.

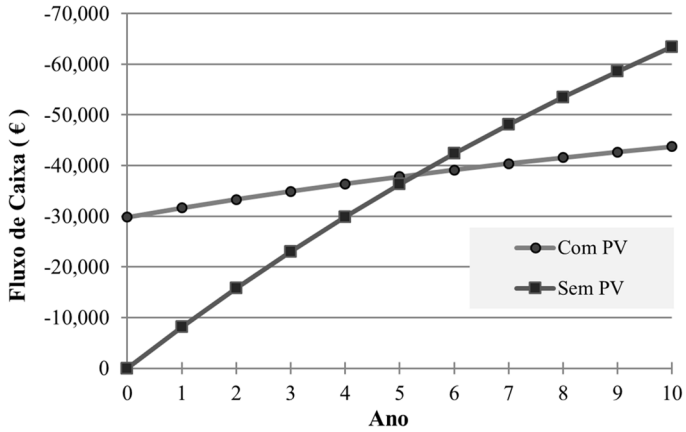
A Tabela 21 sumaria os custos e a redução anual obtida com a adoção do campo PV.

Tabela 21 – Custos e redução dos custos

Custos e Redução dos Custos			
Custo inicial nos cenários com solar (PV) : 29.850,00 €			
Consumo	**Condição**	**Custo Anual (€)**	**Redução Anual (€)**
Edifício	Sem Solar	4.773,00	5.046,00
	Com Solar	-273,00	
VE's	Sem Solar	4.285,00	4.873,00
	Com Solar	-588,00	
Total	Sem Solar	8.618,00	6.732,00
	Com Solar	1.886,00	

Comparando o cenário de consumo total com PV e sem PV, chegamos ao período de retorno do investimento em cerca de cinco anos, tal como se mostra na Figura 8.

Figura 8 – Retorno de investimento – *Payback*



7 Otimização do Sistema Fotovoltaico

Escolhida a potência de geração do sistema como 28.8 kW e a do inversor como 27.6 kW, a configuração final do sistema para identificação na DGEG é a seguinte:

- Características do inversor escolhido:

  Fabricante: ABB;

  Modelo: TRIO-27,6-TL-OUTD-S2X-400;

- Identificação para cadastro no DGEG:

  Fabricante: POWER-ONE ITALY SPA*;

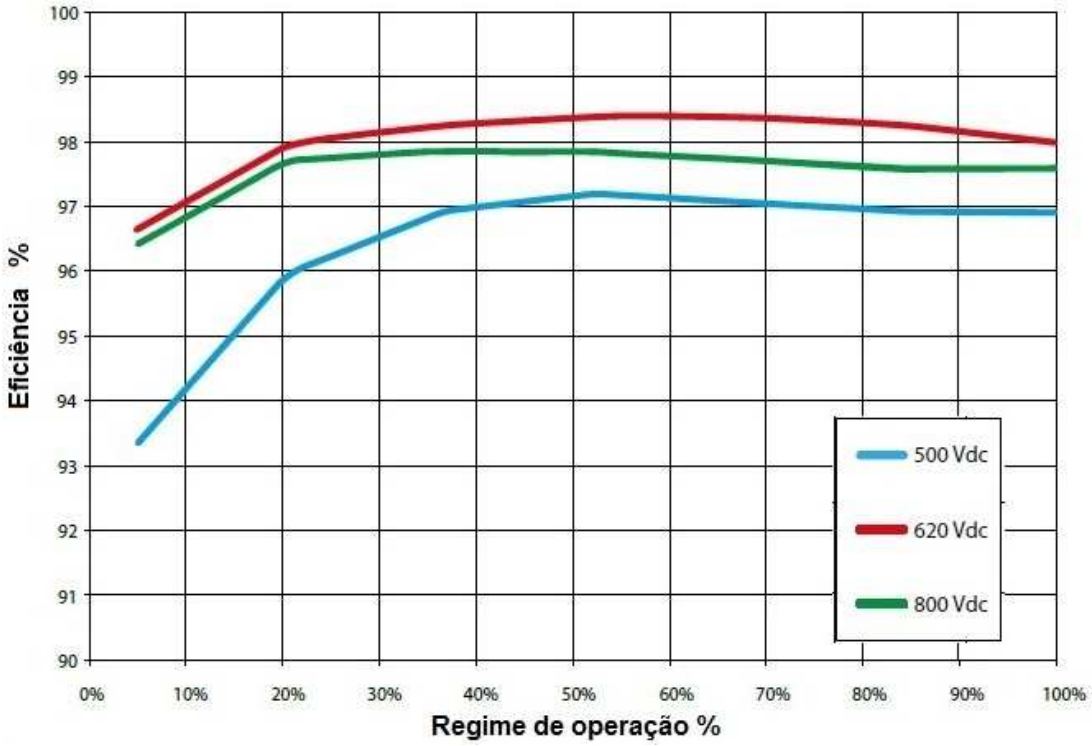
  Modelo: TRIO-27.6-TL-OUTD-S2-400;

  Certificado Nº: 28105856 002

  Validade do certificado: 08/SET/2018

Para manter o regime de trabalho do inversor próximo da sua eficiência máxima de 98,2% (Figura 9) a instalação elétrica dos painéis fotovoltaicos deve garantir uma tensão nominal em CC próxima de 620 Vdc e corrente máxima de 32 A conforme limite de entrada DC do inversor.

Figura 9 – Curva de Eficiência do Inversor TRIO



(ABB Solar Inverters - ABB Group, 2015)

Deste ponto de vista foi adotada uma configuração de seis fileiras paralelas (*strings*) de vinte painéis que geraram um sistema de 750 V, encontrando-se dentro das melhores curvas de eficiência do inversor

*A empresa italiana Power-One foi adquirida pela suíça ABB.

Vinte painéis com um Voc de 37,4 V ligados em série geram uma tensão de 748 V, a qual oscila com a irradiação solar, mas mantem um regime de eficiência maior para o inversor. A conexão em paralelo resulta na soma das correntes. Esta técnica é utilizada em sistemas autónomos de geração. (Portal Energia - Instituto Superior Técnico, janeiro de 2004)

Em sistemas com ligação à rede, utilizam-se fileiras de painéis conectadas em paralelo, sendo que o número de painéis em cada fileira depende da tensão do sistema, neste caso os 748 V até um máximo de 1000 V. (Portal Energia - Instituto Superior Técnico, janeiro de 2004) (ABB Solar Inverters - ABB Group, 2015)

A corrente do sistema pode alcançar 50 A e, por segurança os seis *strings* foram divididos pelas duas entradas MPPT do inversor, ficando três *strings* para cada MPPT podendo cada uma alcançar picos de 40 A em um regime de trabalho de 32 A cada.

8 Observações finais

Este projeto satisfaz os objetivos da empresa de assumir a sua independência relativamente à RESP no carregamento de sua frota de VE.

As vantagens como as isenções de impostos na compra de VE, as considerações sobre a depreciação do veículo nos impostos anuais e a isenção de imposto de circulação, são alguns dos pontos positivos desta escolha, além do menor custo de manutenções.

Um estudo de quilometragem e tempo passível de carregamento deve ser realizado para a escolha do modelo de VE correto.

Com novas tecnologias fotovoltaicas e a maior dispersão comercial destes sistemas, os valores de aquisição são reduzidos ano após ano, facilitando novos investimentos neste sector.

Os métodos para desincentivar o sobredimensionamento, a nova Taxa de Registo do PV e a Taxa Periódica para PV instalados, mesmo sem conexão à RESP, vêm dificultar o investimento nos sistemas solares. O investidor particular não obtém descontos nos impostos e paga as mesmas taxas impostas às empresas. Investidores particulares e empresariais pagam uma taxa de 250€ para um sistema entre 5 kW e 100 kW.

Normalmente, veículos particulares não ficam nas residências nos horários de geração solar. Um estudo deve ser realizado de forma mais detalhada e a adição de baterias para armazenar a geração fotovoltaica deve ser considerada. (Real Solar - Energia Renovável do Brasil, s.d.)

Outro forte impacto na opção particular é o aumento da potência contratada na residência e a alteração de instalação monofásica para trifásica, caso necessário. Porém, quanto maior a

potência contratada, maior será o valor da fatura de energia elétrica mensal, mesmo com redução no preço do kWh. As opções tarifárias bi-horárias são bem-vindas em residências com carregador para VE.

Deve realizar-se um levantamento detalhado dos investimentos e das alterações necessárias ao quotidiano da empresa e das pessoas. As soluções apresentadas neste projeto são úteis e válidas mas requerem um compromisso e adaptação dos seus utilizadores.

9 Conclusões

O investimento em sistemas fotovoltaicos para auxílio de carregamento dos veículos elétricos é válido, aplicável e passível de realização no mercado energético atual.

Com base em estudos, pesquisas e na utilização de sistemas de simulação os objetivos de dimensionar e instalar um sistema fotovoltaico foram cumpridos com a instalação PV conectada ao circuito elétrico do edifício e ao sistema de carregamento, alcançando o objetivo de suprir os consumos da empresa e ainda fornecer o excedente à RESP. A instalação realizada enquadra-se no cenário 6, que apresentou um melhor acordo entre a redução de consumo à RESP e a venda do excedente.

Economicamente, a simulação do cenário 6 apresentou uma redução anual de 80% nos custos perante a RESP, superior a 6.700€. Houve uma redução de 85% no consumo energético anual à RESP, próxima dos 40.000 kWh/ano.

O sistema PV reduziu o impacto ambiental causado pelos consumos energéticos da empresa. Nas emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE) houve uma queda expressiva para todos os cenários. Para o cenário 6 foi constatada uma redução superior a 85%, cerca de 4 ton/ano, mantendo as emissões de dióxido de carbono em 750 kg/ano.

As simulações do sistema de carregamento com auxílio de painéis fotovoltaicos demonstraram que foi alcançado um perfil de utilização próximo do carregamento 100% solar, um dos principais objetivos da empresa. Constatou-se que na atual utilização da frota de VE, há a necessidade de consumir energia elétrica a partir da RESP durante o inverno.

O sistema fotovoltaico com potência de 28.8 kW e o inversor com potência de 27.6 kW foram as melhores escolhas em todos os cenários devido ao menor custo anual no consumo de energia elétrica. Os cenários com consumos independentes: “Somente o edifício” ou “Somente o carregamento dos VE”, apresentaram sobredimensionamento do sistema gerador. Os valores de reembolso do excedente energético desfavorecem este sobredimensionamento.

References

ABB Solar Inverters - ABB Group. (2015). Product Manual: TRIO-20.0/27.6-TL-OUTD (20.0 to 27.6 kW).

ENFORCE. (22 de agosto de 2016). ENFORCE regista patente de InCh (Estação carregamento rápido VEs) nos EUA. Obtido em 24 de setembro de 2016, de Notícias - Enforce: http://www.enforce.pt/Default.aspx?p=energia&s=4&lang=PT

ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. (2009). Ciclo diário para fornecimentos em BTE e BTN em Portugal Continental. Obtido em 21 de Novembro de 2016, de Períodos Horários: http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/periodoshorarios/Paginas/CiclodiariofornecBTEBTNPt.aspx

Lightway Green New Energy Co.,Ltd. (2016). LIGHTWAY Solar Module - P1650x990 Series key features. Hebei, China: Lightway Australia.

OMI-Polo Español S.A. (OMIE). (18 de março de 2016). Preço horário do mercado diário - Ano 2015. Obtido em 18 de março de 2016,

de OMIE: http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf

Portal Energia - Instituto Superior Técnico. (janeiro de 2004). Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projecto e instalação. Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa.

Real Solar - Energia Renovável do Brasil. (s.d.). Os Sistemas - Conectados à Rede e Isolados. Obtido em 26 de agosto de 2016, de Real Solar: http://real-solar.com/como-funciona.php

Smartflower Company (2016). (s.d.). Smartflower POP. Obtido em 24 de setembro de 2016, de www.smartflower.com/pt/smartflower_pop

Authors Profiles:

Leandro Henrique Pinto Dantas has BSc degree in mechanical engineering at Universidade Paulista in 2012 and Master's in Sustainable Energy System in 2016 at Universidade de Aveiro. Has worked with South Korean and Chinese automotive industry and generator set industry, in special at Cummins Inc. Has developed and designed the airport's GPU project at company Hannaik in 2017, Portugal.

Fernando José Neto da Silva has obtained is BSc degree in mechanical engineering at University of Coimbra in 1985 and its PhD in applied energy at Cranfield University (formerly, Cranfield Institute of Technology), United Kingdom in 1992. He has worked as energy manager at Fábricas Mendes Godinho, Tomar (1985-87) and as member of the Executive Board of the company Metro Mondego, SA (2000-2002). He has lectured at Instituto Superior de Transportes (1993-1996) in accumulation with the functions of Director of the Department of physics and energy and Director of the Governing Board of the extension of the Entroncamento. He is an Assistant Professor at the Department of Mechanical Engineering, Universidade de Aveiro, since 1996. He has lectured at the Universidade de Aveiro Integrated master's courses in mechanical engineering, Master's degree in Sustainable Energy Systems, Master's degree in Engineering and Product Design, Doctoral Programme in Mechanical Engineering, Doctoral program in Energy Systems and Climate Change. He has conducted scientific research activity and cooperation with society in the fields of development of endogenous energy potential, development of new production methods, development of heat storage technologies, and study of drying kinetics. He was coordinator of the thematic group Biofuels in the Renewable Energy Forum and member of the Working Group "Global Transport and Energy Development -The Route to the Future" of the World Energy Council in representation of the Portuguese Association of Energy.

Santos Paulo Oliveira, assistant professor at the University of Aveiro, graduated in Electronic Engineering and Telecommunications at the University of Aveiro, obtained his Master's Degree in "Computer and Communications Engineering - branch of computer networks" at the University of Coimbra and his PhD in " Industrial Automation "at the University of Aveiro. Since 1995, he has taught several disciplines, namely, Drive and Command Technologies, Integrated Production Control, Intelligent Manufacturing Systems, Industrial Informatics, Automation II, Numerical Machine Tool, Introduction to Computing, Programming and Data Structures and Algorithms, Electrotechnology, and Automation Industrial. Has participated and coordinated several projects between the University of Aveiro and several companies. He is currently the Course Director of the Master in Industrial Automation Engineering.