

<https://eventos.utfpr.edu.br/sei/sei2018>

Estudo Experimental de Sistema de Condicionamento de Ar Modificado Associado a um Armazenador Térmico

Experimental Study of Modified Air Conditioning System Associated with a Thermal Storage

Bruno Silva Ladeira

brunoladeira@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil.

Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto

ismaelneto@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil.

Prof. Dr.-Ing. Rodrigo Corrêa da Silva

rodrigossilva@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil.

Prof. Dr. Rafael Sene de Lima

rafaellima@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil.

Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo

ricardosalvo@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil.

RESUMO

OBJETIVO: A presente proposta de inovação tecnológica busca avaliar a viabilidade da instalação de um trocador de calor do tipo casco-tubo em um aparelho de ar condicionado, com o objetivo de reaproveitar a energia térmica rejeitada para o aquecimento de água. **MÉTODOS:** Foram analisados dois equipamentos sendo o primeiro mantido originalmente e o segundo modificado, no qual foi instalando um trocador em série com a unidade condensadora. Para analisar o funcionamento dos equipamentos, foram instalados termopares, transdutores de pressão e um medidor de vazão, permitindo o levantamento dos estados termodinâmicos a partir da aquisição de dados por meio do software LabVIEW®. **RESULTADOS:** Após a aquisição das temperaturas médias de entrada e saída da unidade condensadora do sistema convencional, foi possível dimensionar o comprimento de 4,0 m para a tubulação de cobre no interior do trocador de calor. Análises prévias dos dados apresentaram um aumento médio na temperatura do reservatório de 10°C para um volume de 500 litros. **CONCLUSÕES:** Verificou-se que o sistema de condicionamento de ar apresenta variações de acordo com a temperatura externa, devido a sensibilidade do fluido refrigerante às variações climáticas. Com base nos dados de temperatura obtidos no reservatório observou-se a ocorrência da estratificação térmica em seu interior, apresentando maior concentração de energia no topo do reservatório com aproximadamente 100 litros de água aquecida a 40°C.

PALAVRAS-CHAVE: Reaproveitamento térmico. Ar condicionado. Trocador de calor.

ABSTRACT

OBJECTIVE: The present proposal of technological innovation aims to the viability of installing a shell and tube heat exchanger in the air conditioner system, to reuse the rejected thermal energy for heating water. **METHODS:** Two equipment were analyzed, the first one being kept originally and the second being modified, which the heat exchanger were connected with the condensing unit in serial. In order to analyze the operation of the equipment, thermocouples, pressure transducers and a flow meter were installed, allowing the thermodynamic states to be obtained from the acquisition of data in the LabVIEW® software. **RESULTS:** After acquiring the average inlet and outlet temperatures of the condenser unit of the conventional system, it was possible to size 4.0 m length for the copper tubing inside the heat exchanger. Preliminary data analysis showed an average increase in thermal storage temperature of 10°C for 500 liters volume. **CONCLUSIONS:** It has been found that the air conditioning system exhibits variations according to the external temperature due to the sensitivity of the refrigerant to the climate change. Based on the temperature data obtained in the storage, it was observed the occurrence of the thermal stratification inside, presenting higher concentration of energy at the top with approximately 100 liters of water heated at 40°C.

KEYWORDS: Thermal recovery. Air conditioning. Heat exchanger.

Recebido: 31 ago. 2018.

Aprovado: 18 set. 2018.

Direito autorial:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Segundo os dados do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2017) a geração de eletricidade por sistemas hidráulicos é a base da cadeia de fornecimento no Brasil (68,1%). As demais fontes representam percentual inferior aos dez por cento, sendo elas gás natural (9,1%), biomassa (8,2%), eólica (5,4%), derivados de petróleo (3,7%), carvão e derivados (2,9%), nuclear (2,6%) e a solar que não apresenta valores significativos. Ainda segundo o BEN, o consumo residencial representa 21,4% de toda a eletricidade fornecida, aproximadamente 133 TWh.

De acordo com a Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída (BRASIL, 2015), o uso de aparelhos de ar condicionado representa o maior impacto no consumo doméstico de eletricidade, em média 640 kWh/ano. Desta forma, verifica-se a relevância do conforto térmico no consumo, ao se comparar com outros equipamentos como o freezer que consome em média 479 kWh/ano e o chuveiro 493 kWh/ano.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), realizou um estudo onde estimou-se que até o ano de 2050 o número de aparelhos de ar condicionado presentes a cada 100 residências brasileiras deve aumentar de 23 para 137. Devido a esse aumento, projetou-se um acréscimo no consumo de energia elétrica, mesmo sendo consideradas melhorias na eficiência dos equipamentos de aproximadamente 0,2% ao ano (BRASIL, 2016).

Para suprir esses aumentos na demanda por energia elétrica, busca-se formas de melhorar o desempenho dos equipamentos a partir de modificações nos aparelhos para reduzir o seu consumo, ou então desenvolver projetos que reaproveitem a energia consumida e necessária ao funcionamento do equipamento. O reaproveitamento consiste em utilizar a energia recuperada para realizar outra finalidade, reduzindo-se assim a necessidade do consumo de energia elétrica para aquecimento direto.

No presente estudo busca-se analisar a eficiência da instalação de um sistema de reaproveitamento de calor em aparelhos de ar condicionado para o aquecimento e armazenamento de água permitindo a sua posterior utilização.

MÉTODOS

Nas próximas seções serão apresentadas as seguintes metodologias: construção da bancada experimental; instalação dos aparelhos de ar condicionado; aquisição de dados do sistema convencional; estimativa do comprimento; fabricação e instalação do trocador de calor e instrumentação do sistema modificado.

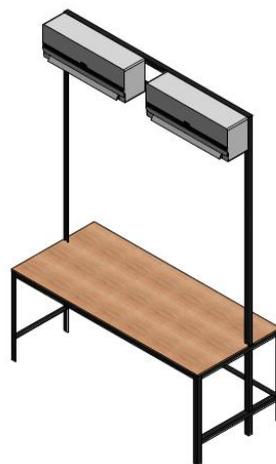
CONSTRUÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

No início do projeto verificou-se a necessidade de realizar a construção de uma bancada de teste a fim de comportar a instalação das unidades evaporadoras presentes nos dois sistemas de ar condicionado e ainda os equipamentos necessários para a aquisição de dados e realização dos experimentos. O projeto da bancada foi desenvolvido com auxílio do software Autodesk Inventor®, onde foram definidas as características necessárias para a bancada (Figura 1a). Durante a elaboração do projeto, verificou-se as exigências da norma ABNT-NBR 16655-

2:2018 para a instalação dos equipamentos de ar condicionado, sendo necessário uma altura de 2,3 m na região de instalação das evaporadoras, além de espaçá-las entre si e distanciá-las das paredes em 0,15 m com a finalidade de se evitar interferência no seu funcionamento.

Para construção da bancada, utilizou-se cantoneiras perfil “L” de 1.1/2” com abas iguais e espessura de 1/8”. Foram necessárias operações de corte com uma serra de disco abrasivo e soldagem utilizando eletrodos revestidos de 2,5 mm de diâmetro. Para evitar a oxidação após a fabricação, realizou-se a limpeza seguida do lixamento da estrutura e posterior aplicação de tinta preta fosca.

Figura 1 - Bancada elaborada para realização do experimento: a) Modelo no Autodesk Inventor®; b) Bancada construída.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2018).

INSTALAÇÃO DOS APARELHOS DE AR CONDICIONADO

Primeiramente instalou-se as evaporadoras na parte superior da bancada (Figura 1b) e em seguida as unidades condensadoras foram instaladas na parte externa do laboratório, por meio de suportes fixados na parede. Após a fixação das unidades condensadoras, instalou-se a tubulação de cobre por onde irá circular o fluido refrigerante. Foram necessárias operações de corte, dobra, flangeamento e soldagem por Foscooper. Para evitar danos no tubo capilar, foi instalado um filtro secador para reter possíveis particulados. A tubulação foi isolada com tubos flexíveis de espuma, reduzindo a influência da radiação e a troca de calor com o ambiente. Após finalizada a instalação, acoplou-se uma bomba de vácuo a tubulação do sistema convencional para remover o ar e a umidade presente. Após a verificação da ausência de vazamentos, foi realizada a inserção do fluido refrigerante R22 até a obtenção da pressão de trabalho recomendada.

AQUISIÇÃO DE DADOS DO SISTEMA CONVENCIONAL

A aquisição inicial de dados foi realizada somente no sistema convencional, onde foram obtidas temperaturas de entrada e saída da condensadora. Com estes dados foi possível estimar o comprimento da tubulação de cobre necessária para a fabricação do trocador de calor do tipo casco-tubo. Na medição das

temperaturas foram utilizados termopares do tipo “T”. Na sua fabricação utilizou-se soldagem por oxiacetileno para a formação da esfera de contato. A aquisição na unidade condensadora foi realizada por quatro termopares, divididos entre entrada e saída devido a uma bifurcação na tubulação utilizada.

Verificou-se a necessidade de adquirir as temperaturas do ambiente externo, e para isso fixou-se o termopar em um suporte envolto em papel alumínio, para que os efeitos da radiação fossem reduzidos. Instalou-se também um ventilador na parte inferior do suporte para forçar a circulação de ar, evitando que ocorresse um efeito de estufa.

Os dados obtidos foram tratados com o auxílio de uma lógica montada no programa LabVIEW®. A lógica desenvolvida consiste em automatizar funções como leitura e salvamento dos dados, além de gerar uma interface gráfica que permite a visualização instantânea das temperaturas.

ESTIMATIVA DO COMPRIMENTO DO TROCADOR DE CALOR CASCO-TUBO

Com o objetivo de definir o comprimento da tubulação de cobre a ser utilizada no trocador de calor, utilizou-se o equacionamento presente no livro Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa (INCROPERA et al., 2008). Por ser resolvido através de métodos iterativos e por necessitar das propriedades termodinâmicas, utilizou-se como ferramenta de cálculos o software EES®. A metodologia de cálculos utilizada, consiste em considerar que o trocador de calor será capaz de transferir a mesma quantidade de energia que a condensadora original. Para isso, um balanço de energia foi equacionado, igualando-se a troca de calor do ar no sistema convencional com a água no modificado, sendo inserido um termo de eficiência para compensar as perdas, conforme Eq. (1).

$$h_{H_2O} \cdot A_{Troc} \cdot \eta \cdot (\Delta T) = h_{Ar} \cdot A_{Cond} \cdot \Delta T_{Im} \quad (1)$$

Onde:

h_{H_2O} - Coeficiente convectivo da água;

A_{Troc} - Área superficial do trocador de calor;

η - Eficiência do trocador de calor;

ΔT - Gradiente de temperatura entre entrada e saída do trocador;

h_{Ar} - Coeficiente convectivo do ar;

A_{Cond} - Área superficial da tubulação da condensadora;

ΔT_{Im} - Gradiente de temperatura do ar na transversal da condensadora.

Para calcular o balanço de energia, foi necessário definir os valores dos coeficientes convectivos da água e do ar, calculados por meio da Eq. (2).

$$h = Nu \cdot \frac{k}{D} \quad (2)$$

Onde:

h - Coeficiente convectivo;

Nu - Número de Nusselt;

k - Coeficiente de condutividade térmica;

D - Diâmetro da tubulação.

O coeficiente convectivo é dependente de vários fatores como temperatura, geometria, além das propriedades físicas do fluido. Com isso, utilizam-se correlações obtidas experimentalmente para a sua obtenção. A Eq. (3) apresenta a correlação de Zukauskas, utilizada para o ar.

$$Nu_{Ar} = C2 \cdot C \cdot Re^m \cdot Pr^{0,36} \cdot \frac{Pr^{1/4}}{Pr_s} \quad (3)$$

Onde:

Nu_{Ar} - Número de Nusselt para o escoamento de ar,

$C2$ - Constante (INCROPERA et al., 2008);

C - Constante (INCROPERA et al., 2008);

Re_D - Número de Reynolds;

m - Constante (INCROPERA et al., 2008);

Pr - Número de Prandtl externo;

Pr_s - Número de Prandtl da superfície da tubulação.

A Eq. (4) é a correlação Gnielinski, a qual foi utilizada para definir o número de Nusselt da água. Ela apresenta um erro aproximado de 10% e necessita que se defina um fator de atrito (F_{at}) obtido do diagrama de Moody (INCROPERA et al., 2008).

$$Nu_{H_2O} = \frac{\frac{F_{at}}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \frac{F_{at}}{8}^{1/2} \cdot Pr^{2/3} - 1} \quad (4)$$

Onde:

Nu_{H_2O} - Número de Nusselt para o escoamento de água;

F_{at} - Fator de atrito;

Re - Número de Reynolds;

Pr - Número de Prandtl.

Para o cálculo das correlações foram utilizados números de Prandtl que são encontrados na literatura (INCROPERA et al., 2008). Já os números de Reynolds devem ser calculados segundo as Eqs. (5) e (6), já que são particulares para cada situação.

$$Re_{Ext} = \frac{V_{Max} \cdot D_{Ext}}{\nu} \quad (5)$$

Onde:

Re_{Ext} - Número de Reynolds para escoamento externo;

V_{Max} - Velocidade máxima do escoamento de ar;

D_{Ext} - Diâmetro externo da tubulação;

ν - Viscosidade cinemática do ar.

$$Re_{Int} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_{Int} \cdot \mu} \quad (6)$$

Onde:

Re_{Int} - Número de Reynolds para escoamento interno;

\dot{m} - Vazão mássica do fluido refrigerante;

D_{Int} - Diâmetro interno da tubulação;

μ - Viscosidade do fluido refrigerante R22.

Após definir as variáveis necessárias foi possível calcular a área da tubulação (A_{Troc}) que será utilizada na fabricação do trocador de calor. Sabendo que o diâmetro do tubo a ser utilizado é de 1/4", pode-se definir o comprimento da tubulação de cobre.

FABRICAÇÃO E INSTALAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR

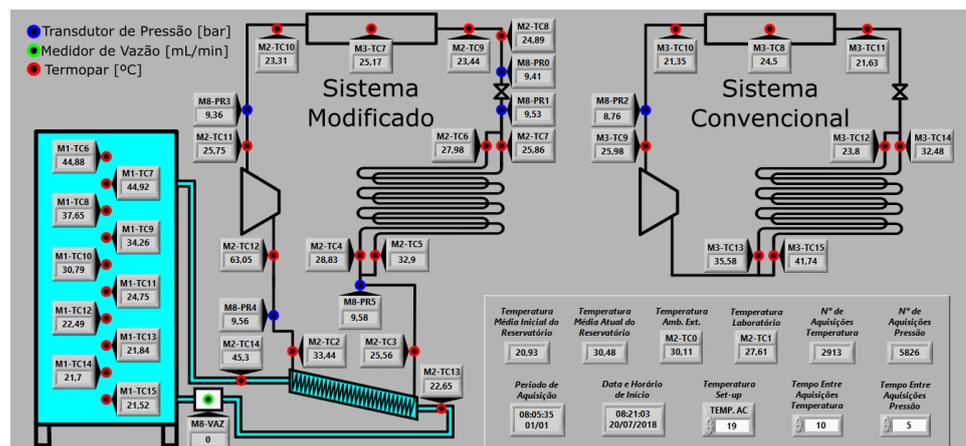
O trocador de calor a ser fabricado é do tipo casco-tubo, onde a tubulação interna é de cobre e a externa de PVC. O comprimento calculado, refere-se a área necessária para troca de calor entre a água e o fluido refrigerante através da tubulação de cobre. Dividiu-se o comprimento em dois segmentos os quais foram moldados em formato helicoidal, reduzindo o tamanho do trocador e melhorando a eficiência da troca ao aumentar a turbulência. O fluxo de água ocorre por convecção natural, uma vez que busca-se não aumentar o consumo de energia elétrica.

INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA MODIFICADO

Após a instalação do trocador de calor, foram instalados 12 termopares no sistema modificado. A distribuição dos termopares acompanha os pontos de medição do sistema convencional para realizar possíveis comparações entre os dois equipamentos. Além dos termopares no sistema modificado, foram instalados dois termopares no trocador de calor e dez termopares no reservatório térmico. O reservatório utilizado é encontrado comercialmente, sendo que os termopares foram espaçados de 150 mm. Esta distância é recomendada segundo (NETZEL et. al, 2017), devido à pouca variação de temperatura caso houvessem mais termopares.

Para obter as propriedades termodinâmicas dos aparelhos de ar condicionado, foram instalados transdutores de pressão em pontos próximos aos de medição de temperatura. Instalou-se também um medidor de vazão volumétrica no sistema modificado. Desta forma, pode-se acompanhar a variação da vazão instantânea de água por convecção natural.

Figura 2 - Interface gerada no software LabVIEW®



Fonte: Autoria própria (2018).

Com ambos os sistemas em funcionamento, verificou-se a necessidade de expandir e melhorar o sistema de aquisição de dados. Para isso, reformulou-se a lógica montada no programa LabVIEW®. Os pontos de medição de temperatura, pressão e vazão volumétrica estão indicados na interface montada (Figura 2).

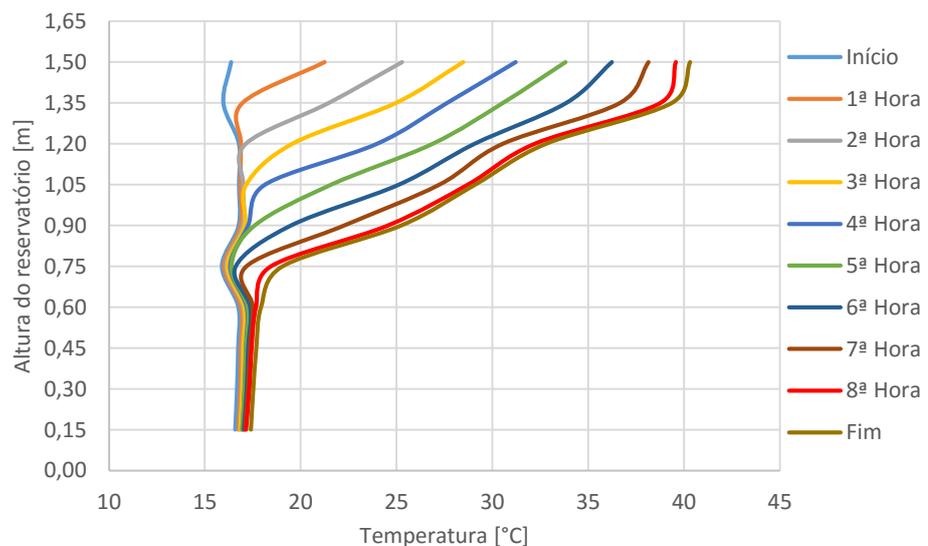
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a operação verificou-se variações na pressão de trabalho do sistema de ar condicionado modificado, aparentando sinais de vazamento. Para corrigir o problema realizou-se testes nas conexões com nitrogênio líquido e também com espuma. Após identificar as conexões com vazamento, foi necessário remover e substituí-las por uniões soldadas.

O objetivo da aquisição inicial foi de levantar as temperaturas médias de entrada e saída da unidade condensadora presente no sistema convencional. Os valores encontrados foram de 59,66°C para entrada e 31,28°C para saída. Com o gradiente de temperatura realizou-se os cálculos para definir o comprimento do trocador de calor. Para o balanço utilizou-se uma eficiência para o trocador de 70%, obtendo um comprimento de tubulação de 4,0 m e este foi dividido em duas helicoides concêntricas.

Análises preliminares apontam um aumento médio na temperatura da água do reservatório de aproximadamente 10°C para o volume total de 500 litros. Os dados obtidos seguem um planejamento experimental, onde há previsão para 30 dias de testes e mais duas réplicas para cada dia.

Figura 3 - Perfis de temperatura da água no reservatório térmico



Fonte: Autoria própria (2018).

Avaliando os perfis de temperatura (Figura 3), observa-se que o aumento na temperatura da água se concentra no topo do reservatório devido a estratificação térmica, apresentando aproximadamente 100 litros de água a 40°C no decorrer das horas de teste.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo realizou-se a instalação de dois aparelhos de ar condicionado, onde um foi mantido convencional e outro modificado com a inserção de um trocador de calor do tipo casco-tubo.

Ao se verificar os dados obtidos, foi possível analisar previamente a influência da temperatura externa e da umidade relativa do ar no funcionamento do

aparelho de ar condicionado. Essa influência ocorre devido as propriedades do fluido refrigerante ser sensível as variações climáticas. Devido a essa dependência, observou-se que ao manter a pressão de 4,0 bar na região da sucção do compressor, em dias com baixa temperatura e alta umidade, ocorre o congelamento da tubulação, afetando assim o funcionamento do sistema de condicionamento de ar.

O trocador desenvolvido foi utilizado para o reaproveitamento do calor liberado para o aquecimento de água. Observou-se também a variação de temperatura de 28,38°C entre a entrada e saída do trocador de calor durante todo o experimento, proporcionando um aumento de aproximadamente 20°C entre a base e o topo do reservatório térmico. Um dos objetivos de armazenar água aquecida é o de reduzir o consumo de energia elétrica ou evitar a queima de combustíveis para o seu aquecimento.

Contudo, o estudo de viabilidade do presente trabalho visa difundir e contribuir na diversificação de tecnologias mais limpas e no desenvolvimento sustentável no Brasil.

AGRADECIMENTOS

À UTFPR campus Londrina pela bolsa de Iniciação à Inovação, ao Grupo de Pesquisa em Energia e Engenharia Térmica (ETE) e as empresas parceiras pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2017. 61 p. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final%202017%20Web.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **Eficiência energética e geração distribuída para os próximos 10 anos**. Rio de Janeiro, 2015. 92 p. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-264/DEA%2012-16%20-%20Ef%20energetica%202015-2024\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-264/DEA%2012-16%20-%20Ef%20energetica%202015-2024[1].pdf)>. Acesso em: 29 ago. 2018.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **Demanda de Energia 2050**. Rio de Janeiro, 2016. 257 p. (Estudos de demanda energética). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 643 p.

NETZEL, R. A. et al. Ajuste de Modelo do Comportamento Térmico de um Reservatório Acoplado a um Refrigerador Modificado. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22, 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2017/index>>. Acesso em: 28/08/2018.