

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM CICLO
ECONOMIZADOR DE ENERGIA PARA UMA SALA DE PAINÉIS DE UMA LINHA DE
PRODUÇÃO DE NÃOTECIDOS

por

Victório Hofmeister

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

de Hofmeister, Victório

AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM CICLO ECONOMIZADOR DE ENERGIA PARA UMA SALA DE PAINÉIS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE NÃOTECIDOS/ Victório Luiz Graziadei Hofmeister. – 2022.

26 f.

Orientador: Diogo E. V. Andrade

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Energy efficiency. 2. EnergyPlus. 3. Air-conditioning. I. E.V. Andrade, Diogo, orient.

Victório Hofmeister

Avaliação de Viabilidade de implementação de um Ciclo Economizador de Energia para uma Sala de Painéis de uma Linha de Produção de Nãotecidos

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte/Processos de Fabricação/Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Diogo E. V. Andrade

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Schneider

Prof^a. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Cirilo Seppi Bresolin

Porto Alegre, maio de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais que sempre me deram carinho, foram atenciosos e me deram todas as condições para que eu me desenvolvesse profissional e pessoalmente, possibilitando que eu focasse a minha atenção para aquilo que realmente importa.

Espero que com esse trabalho eu esteja retribuindo uma pequena parcela do tanto que eles já fizeram por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais Victor e Rosane, ao meu irmão Vicente, à minha namorada Raquel, ao meu professor orientador Diogo Andrade e ao meu colega de profissão Lucas de Borba. Todos vocês desempenharam papéis fundamentais na confecção desse trabalho, seja direta ou indiretamente, mas sem os quais eu não teria conseguido fazê-lo.

Muito obrigado.

*Se o dinheiro for sua esperança de independência, você jamais a terá;
A única segurança verdadeira consiste numa reserva de
sabedoria, de experiência e de competência.
Harrison Ford*

Hofmeister, Victório. **Avaliação de Viabilidade de implementação de um Ciclo Economizador de Energia para uma Sala de Painéis de uma Linha de Produção de Não tecidos**. 15. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RESUMO

O presente trabalho consiste num estudo de viabilidade econômica de um projeto de eficiência energética de um ciclo economizador de energia, chamado de Ciclo Entálpico. Essa solução tecnológica utiliza um sistema de automação e sensores com o objetivo de optar entre o ar externo ou interno para recircular e refrigerar a sala de painéis de forma a manter a temperatura abaixo de 25°C. É avaliada a quantidade despendida de energia elétrica para refrigerar uma sala de painéis de uma linha de produção de uma fábrica de Não tecidos, supondo dois cenários: com e sem o Ciclo Entálpico. Essa análise é feita por meio de simulações numéricas utilizando o software SketchUp 2017 para definir a geometria da sala e o EnergyPlus (9.2.0) para proceder o estudo do consumo de energia elétrica. Examinando ambas as situações uma diferença de quase 34% de redução na quantidade de energia dispendida, ou ainda, 148 MWh durante o decorrer de um ano. Foi calculada a economia financeira advinda da implementação desse sistema (em R\$) e o *payback*, que é o tempo necessário a contar do início da implementação desse sistema para que os ganhos em decorrência dessa tecnologia se igualem ao investimento inicial, o qual resultou em 3,16 anos.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, EnergyPlus, Ciclo Entálpico

Hofmeister, Victório. **Evaluation of the Feasibility of Implementing an Energy Saving Cycle for a Panel Room of a Nonwovens Production Line**. 2022. 15. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ABSTRACT

The present work consists of an economic feasibility study of an energy efficiency project of an energy saving cycle, called the Enthalpic Cycle. This technological solution uses an automation system and sensors to choose between external or internal air to recirculate and cool the panel room in order to keep the temperature below 25°C. The amount of electrical energy used to cool a panel room of a production line of a Nonwovens factory is evaluated, assuming two scenarios: with and without the Enthalpic Cycle. This analysis is done through numerical simulations using the Energy Plus software (9.2.0) to carry out this thermo-energy study and SketchUp 2017 to define the geometry of the room. Examining both situations, a difference of almost 34% reduction in the amount of energy spent, or even 148 MWh during a year. The financial savings resulting from the implementation of this system (in R\$) and the payback, which is the time required from the beginning of the implementation of this system, were calculated for the gains resulting from this technology to equal the initial investment, which resulted in 3.16 years.

KEYWORDS: Energy efficiency, EnergyPlus, Enthalpic Cycle

NOMENCLATURA

Símbolos

h	Entalpia específica [J/g]
p_v	Pressão parcial de vapor [kPa]
p_{sat}	Pressão de saturação [kPa]
T	Temperatura [°C]
Φ	Umidade Relativa [%]

Abreviaturas e acrônimos

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
NT	Nãotecido
CE	Ciclo Entálpico
HVAC	Heating, ventilating, and air-conditioning.
TMA	Taxa mínima de atratividade
TIR	Taxa interna de retorno

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
	1.1 Objetivos	1
2.	Fundamentação Teórica	2
	2.1. Ciclos Economizadores de Energia para Condicionamento de Ar	2
	2.2. Apresentação do Problema	3
3.	Estudo de caso	5
	3.1. Geometria do modelo e potência dos equipamentos.....	5
	3.2. Localização da edificação e orientação solar	6
	3.3. Condições de contorno, zoneamento da sala e rotinas.....	7
	3.4. Potência e tipo de sistema de HVAC.....	8
	3.5. Cálculo da Entalpia.....	8
	3.6. Inclusão do Ciclo Entálpico na simulação numérica.....	9
	3.7. Materiais empregados na edificação.....	9
4.	Resultados.....	10
	4.1. Perfis de temperatura Fração de Potência e Entalpia.....	10
	4.2. Análise do Consumo e Efetividade do Ciclo Entálpico	13
	4.3. Viabilidade Econômica da implementação do Ciclo Entálpico	13
5.	Conclusão.....	15
	5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	15

1. INTRODUÇÃO

É sabido que muitos países vêm enfrentando dificuldades para suprir a demanda crescente de energia de suas populações (Altoé, 2017). Não sendo possível evitar a degradação ambiental pela exploração dos recursos naturais, uma importante contribuição nesse contexto consiste em reduzir ao máximo o desperdício de energia (Silva, 2005). O presente trabalho inclui-se nesse cenário: no de redução da utilização de energia elétrica, sobretudo no âmbito industrial.

Para o caso das indústrias de Não tecidos¹ (NT) a pandemia ocasionada pelo novo Coronavírus veio para agravar ainda mais esse cenário, uma vez que foram necessários ainda mais energia e insumos para produzir mais e poder atender às demandas crescentes do mercado que dependem do seu fornecimento de materiais para fabricação de máscaras descartáveis. Além dos gastos energéticos para manter as linhas de produção em pleno funcionamento, devem ser contabilizadas a energia dispendida pelos sistemas de utilidades e de condicionamento de ar. Verifica-se, de forma muito recorrente, sistemas de HVAC mal dimensionados ocasionando desperdícios energéticos.

Dentro desse contexto de aumento na quantidade de Não tecidos produzida, sobretudo de máscaras descartáveis, pensou-se em formas de minimizar os custos relacionados ao uso da energia elétrica. Para diminuir o consumo energético para condicionamento de ar, pode-se recorrer a ciclos economizadores de energia, conhecidos também por *free cooling systems*, como é caso do Ciclo Entálpico, CE. Esse sistema toma por base as entalpias médias do ar interno e externo à edificação para optar entre qual dos dois será utilizado para diminuir a temperatura da sala de painéis, aproximando-a do *setpoint* de temperatura sem precisar requerer tanta potência dos compressores se comparado a um sistema convencional de ar-condicionado.

O presente trabalho busca quantificar (em anos) quanto tempo é necessário para que o investimento inicial em decorrência da implementação desse sistema retorne à empresa integralmente, utilizando uma técnica advinda da economia chamada de *payback*. Para geração da geometria será utilizado o *software* SketchUp 2017 e para determinação do consumo energético com e sem o CE o *software* EnergyPlus 9.2.0.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho consiste na determinação do tempo de retorno de investimento após a implementação do ciclo entálpico. A análise de consumo de energia com e sem o ciclo economizado é realizada de forma computacional. A verificação da viabilidade econômica desse projeto é realizada por meio de um cálculo de *payback*.

Tendo em mente o objetivo geral, pode-se traçar os objetivos específicos do trabalho em ordem de execução do projeto:

1º - Projetar e simular a sala de painéis e o sistema de condicionamento de ar com e sem o Ciclo Entálpico, utilizando o *software* EnergyPlus e determinar a quantidade de energia dispendida a menos com a utilização do referido ciclo economizador.

2º - Fazer uma breve análise sobre os perfis de temperatura, potência requerida e as entalpias do ar externo e interno da edificação.

¹ - Conforme a norma NBR-13370, Não tecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinações destes.

3º - Quantificar o tempo do retorno sobre o investimento realizado utilizando a técnica de *payback* descontado ou também chamado de *payback* modificado para verificar a viabilidade desse projeto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados os temas que servem como base teórica para o desenvolvimento do projeto. Inicialmente são tratados dos ciclos economizados de energia e em seguida mais especificamente do ciclo entálpico utilizado no presente trabalho.

2.1. CICLOS ECONOMIZADORES DE ENERGIA PARA CONDICIONAMENTO DE AR

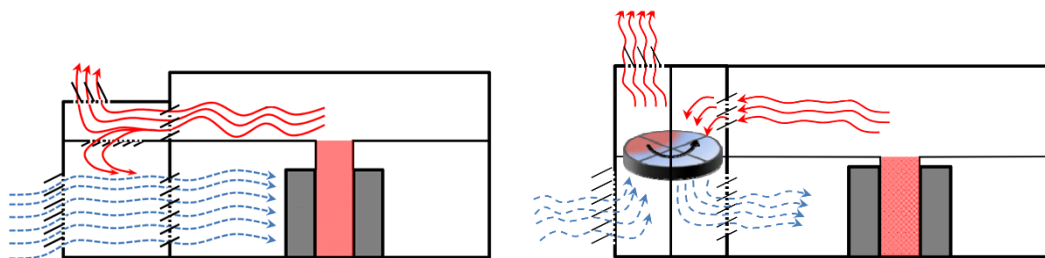
Dentre os ciclos economizadores de energia para sistemas de HVAC, destacam-se os *airside free cooling*²*systems*, como sendo os mais conhecidos e difundidos. Esses sistemas subdividem-se em dois grandes grupos: os diretos e indireto, denominados em inglês como *direct airside free cooling* e *indirect airside free cooling*, respectivamente.

Essa primeira subdivisão faz alusão aos sistemas que tomam diretamente o ar do ambiente externo quando as condições ambientais estão dentro dos valores desejados. Esse tipo de sistema normalmente consiste em um conjunto de atuadores e *dampers* que podem mudar totalmente ou em parte a dinâmica de funcionamento dos compressores, seja utilizando-o exclusivamente ou utilizando apenas o ar externo para refrigerar a sala. Nesse contexto pode-se elencar o Ciclo Entálpico como sendo um exemplo de *direct free cooling system*.

Já os sistemas indiretos operam de forma um pouco distinta do anterior, pois não simplesmente insuflam o ar externo para dentro do ambiente: existe sempre um trocador de calor entre o meio externo e o interno. Um exemplo clássico de um sistema indireto economizador de energia é a *Kyoto Wheel* (Potts, 2011). Esse sistema utiliza o princípio da Roda Entálpica. Essa solução tecnológica é muito utilizada em edificações com grande movimentação de pessoas. Nesses ambientes, além do conforto térmico, exige-se a qualidade do ar para a saúde humana. Portanto, o ar interno precisa ser constantemente renovado. Para essa renovação, o ar interno que está refrigerado precisa ser substituído pelo ar externo à edificação que muitas vezes está em uma temperatura elevada. A ideia da roda entálpica é forçar a troca de calor entre o ar externo que está sendo admitido e o ar interno que está sendo direcionado para fora do edifício. Para não haver a contaminação do ar que está sendo substituído, é utilizado um sistema que refrigera o ar admitido a partir da troca de calor entre o ar que está substituído sem o contato direto entre esses dois fluidos. Esse tipo de sistema auxilia na eficiência energética do sistema de ar-condicionado, uma vez que o ar admitido entra na edificação com temperatura inferior à temperatura externa. Na Figura 1, é evidenciada a diferença essencial entre esses dois tipos de sistemas.

Figura 1: Esquema do modo de funcionamento de sistema *direct air side free cooling* (à esquerda) e *indirect airside free cooling* (à direita). Ambos adaptados de Niemann, J. (2011).

² Essa expressão traduzida para o português é chamada, também, de sistema de “arrefecimento gratuito” ou “arrefecimento livre”.



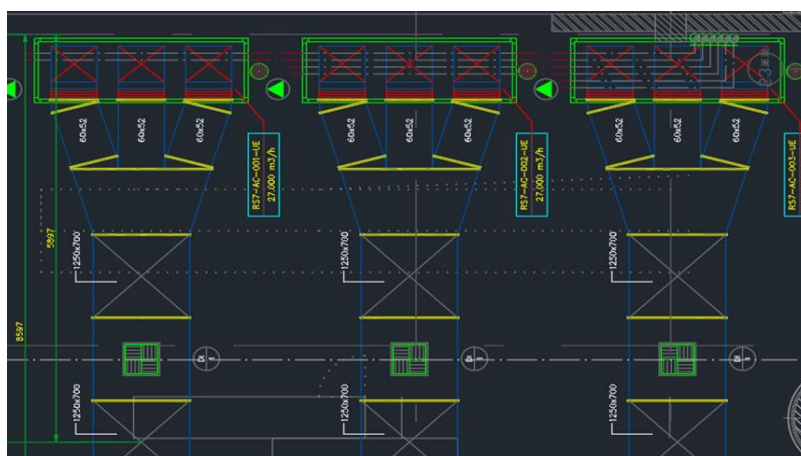
2.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

As grandes indústrias de NT contam, cada qual, com diversas plantas espalhadas ao redor do mundo e possuem tecnologias capazes de produzir NT com muitas especificações, sendo estes divididos em vários grupos, dentre eles destacam-se o *spunbonded*, *meltblown*, *carded*, *airlaid* e *spunlace*. Devido ao fato de serem grandes empresas com plantas em muitos países, configura-se uma dificuldade para os seus gestores, que precisam definir onde um eventual empreendimento ou inovação tecnológica será implementada. Fica evidente o desafio de fazê-lo, uma vez que cada localidade tem suas características próprias, sendo as principais as sociais, geográficas, logísticas e tecnológicas.

No intuito de utilizar os seus recursos de forma mais eficiente, essas companhias desenvolvem projetos capazes de minimizar os gastos energéticos e reduzem custos. A tecnologia abordada nesse trabalho é capaz de diminuir o consumo energético relativo ao condicionamento de ar das salas de painéis e minimizar os gastos referentes à energia elétrica.

Para fins de ambientação, uma sala de painéis contém dispositivos eletrônicos variados, responsáveis tanto pela energização quanto pela automação da linha de produção. Esses aparelhos dissipam potência e geram calor por meio do Efeito Joule, sendo necessário refrigerar a sala de forma adequada para aumentar a vida útil destes dispositivos e garantir uma produção estável. A Figura 2 evidencia o projeto de ar-condicionado da sala de painéis, assim como a localização dos difusores e dutos da sala.

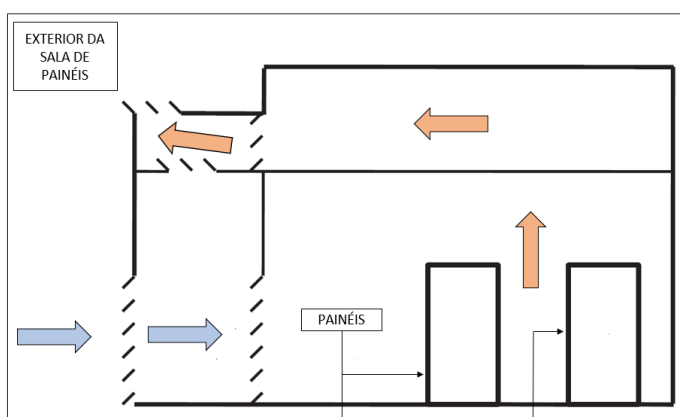
Figura 2: Na porção superior da figura marcados com os “X” vermelhos estão as unidades evaporadoras. Deste ponto partem os dutos que estão conectados aos difusores espalhados pela sala – 36 ao total. Em cinza estão os armários da sala de painéis que contém os componentes elétricos dissipadores de potência.



O princípio de funcionamento da técnica que é abordada no presente trabalho, o CE, consiste no uso de equipamentos para detecção da temperatura e umidade relativa para que o sistema de automação do ar-condicionado da sala de painéis escolha automaticamente entre utilizar o ar interno para recirculação e refrigeração da sala ou o emprego do ar externo para esse mesmo fim. Sempre que o ar externo tiver uma entalpia menor do que o interno, o sistema será acionado e ar de fora da edificação passará a ser insuflado para dentro dessa para auxiliar no condicionamento de ar. Para exemplificar, caso o ar de fora da sala de painéis possua uma entalpia menor do que o interno, placas reguladoras de fluxo de ar são abertas para possibilitar a entrada do ar externo para dentro do sistema de HVAC, diminuindo a quantidade de compressores que seriam requeridos na ausência desse método. Para isso, existem atuadores ligados ao sistema de automação que abrem essas placas, possibilitando a entrada do ar externo para o interior da sala de painéis.

Conforme pode ser visto na Figura 3, quando o CE está operante o ar externo, representado pelas flechas azuis, adentra a sala de painéis pelas placas defletoras de ar devido ao gradiente de pressão gerado pelos ventiladores das unidades evaporadoras auxiliando o sistema de HVAC no condicionamento de ar da sala. As flechas laranjas, por outro lado, representam o ar quente que passa placas reguladoras, que se abrem para o meio externo, possibilitando a saída desse ar mais quente.

Figura 3: Desenho esquemático sobre o modo de funcionamento do ciclo economizador.
Adaptado de Zhang, Hainan (2014).



Na Figura 4 pode-se verificar, na prática, o fluxo de ar nas caixas de mistura das unidades evaporadoras da sala de painéis da empresa de NT escolhida para o estudo de caso para as duas ocasiões: com e sem o CE operante. As flechas laranjas representam o fluxo de ar sem o CE operante, ou seja, com o ar interno adentrando as unidades evaporadoras para recirculação e condicionamento de ar. A flecha azul, por outro lado, evidencia a entrada de ar quando do acionamento do CE: com o ar externo sendo insuflado para dentro da edificação. Esse ingresso do ar para dentro da edificação deve-se ao gradiente de pressão gerado pelos ventiladores das unidades evaporadoras, juntamente com o fechamento dos *dampers* (de retorno) na parte frontal das caixas de mistura, e abertura dos de ar externo, conforme consta na Figura 5.

Figura 4: Ilustração do fluxo de ar com o CE acionado (flecha azul) e desativado (flechas laranjas).

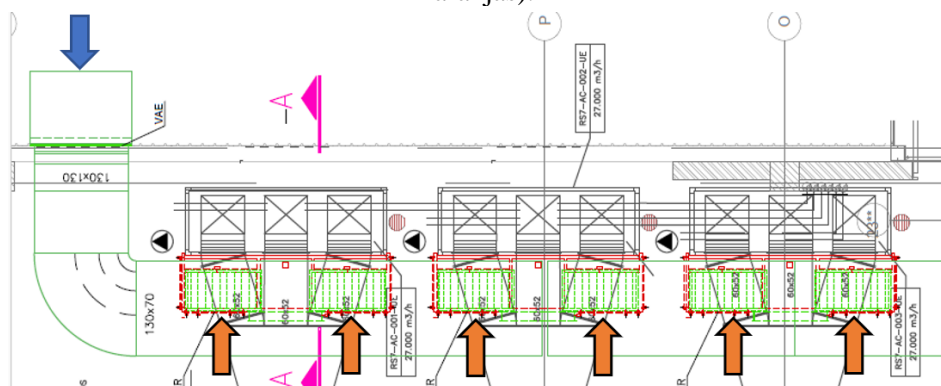
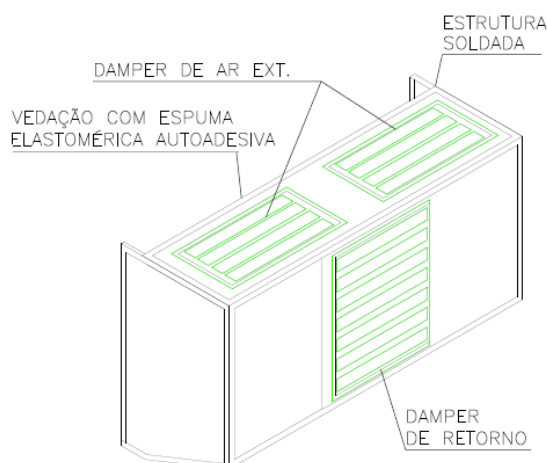


Figura 5: Desenho esquemático da caixa de mistura que mostra os dampers de retorno e de ar externo.



A sala de painéis escolhida é dotada de sensores na parte interna e externa para medição da temperatura e da umidade relativa do ambiente, que são as variáveis utilizadas para determinação da entalpia do ar. São quatro sensores ao todo, sendo três na parte interna e um na externa da edificação. Dentro da sala de painéis, os sensores são posicionados de forma a tentar representar a temperatura média da sala, ou seja, são posicionados de forma a maximizar a distância entre eles, enquanto o sensor externo fica na parte de fora da edificação com uma chapa de metal acima dele, que o abriga da incidência direta de radiação solar e da chuva.

3. ESTUDO DE CASO

Para a realização do presente estudo foi proposta uma rotina de funcionamento dos componentes eletrônicos da sala de painéis, um envoltório, densidade de potência de equipamentos, condições de contorno, dados climáticos daquela região, dentre outras informações. Todos esses aspectos são discutidos nas próximas subseções.

3.1. GEOMETRIA DO MODELO E POTÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

Quando da determinação da geometria da sala de painéis, analisou-se uma planta baixa do sistema de HVAC e dos dutos por onde circula o ar para verificar quais eram as medidas da

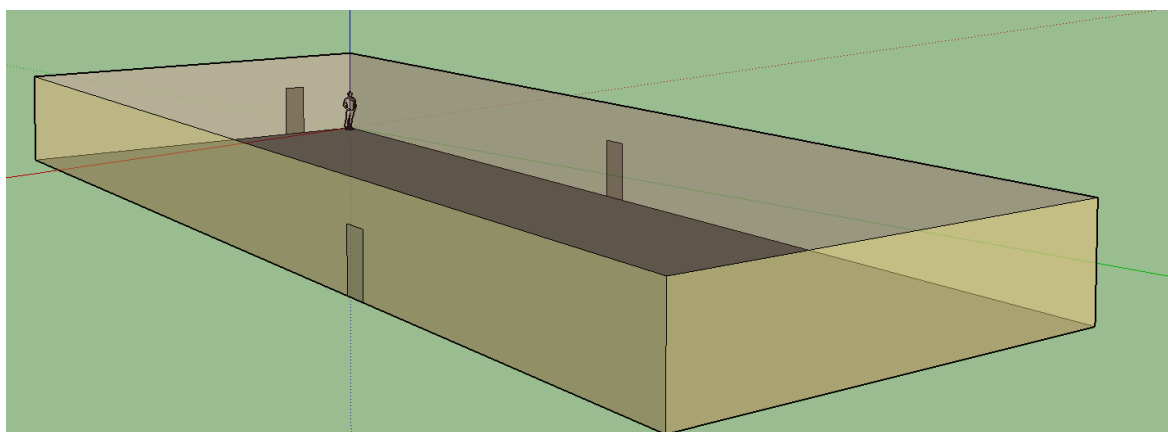
sala de painéis e a sua metragem. Foi realizada, também, uma verificação *in loco* utilizando uma trena a laser para analisar se as medidas indicadas no projeto em formato *.dwg* de fato coincidiam. Na Tabela 1 estão dispostas as dimensões sala de painéis.

Em posse dessas informações foi possível definir utilizando o software *SketchUp* 2017 – conforme pode ser visto na Figura 6 - uma geometria tridimensional que foi incorporada ao arquivo *.idf* para ser utilizada no software de simulação numérica *EnergyPlus* (9.2.0).

Tabela 1: Informações sobre as medidas da sala de painéis sobre a qual irá se desenvolver a análise energética

Informação	Medida
Comprimento da sala	39,55 [m]
Largura da sala	15,21 [m]
Pé direito	3,50 [m]
Área total	601,56 [m ²]
Portas	3 [unid.]

Figura 6: Geometria referente à sala de painéis presente na linha de produção em estudo.



Durante a modelagem foi considerado que dentro da sala de painéis existe uma potência instalada de aproximadamente 670 W/m^2 - dados extraídos do projeto do sistema de condicionamento de ar - proveniente dos componentes eletroeletrônicos operantes dentro dos armários da sala de painéis: esses mesmos dispositivos dissipam calor devido ao efeito Joule. Para fins de quantificação do calor dissipado pelos painéis, considerou-se que a fração radiante média para esses painéis elétricos seja de aproximadamente 5% - percentual médio informado pelo fabricante dos painéis.

3.2. LOCALIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO E ORIENTAÇÃO SOLAR

A edificação modelada está localizada na cidade de Gravataí e encontra-se, portanto, na zona climática Subtropical Temperada. Para fins de simplificação, foi utilizado o arquivo climático do Aeroporto Salgado Filho de Porto Alegre devido à proximidade geográfica dessas localidades. Esse arquivo é de domínio público e é cedido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A distância dessas duas localidades é pequena e não há uma diferença apreciável de elevação, portanto, pode-se assumir que o clima nas duas regiões é praticamente o mesmo, dado que estão separadas por apenas 15,8 km.

Para esse estudo foi identificada também a orientação da edificação relativamente ao norte geográfico. Foi constatado que o local onde essa sala está tem uma orientação de 80° em relação ao norte geográfico: informação essa que foi utilizada como um dado de entrada para proceder a simulação numérica.

3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO, ZONEAMENTO DA SALA E ROTINAS

As paredes Sul e Leste estão expostas ao vento e ao sol, por esse motivo recebem a condição de contorno de superfície externa e estão expostas tanto ao sol quanto ao vento. A superfície Norte recebeu a condição de contorno de superfície interna, uma vez que após essa parede existe uma outra sala com transformadores e não a parte externa da edificação, ou seja, nem a radiação solar, nem o vento incidem naquela superfície. Já para a superfície Oeste foi escolhida a condição de contorno “adiabático”, pois é uma superfície que faz vizinhança com a área de produção, ou seja, há uma geração de calor advinda da área produtiva – que não foi possível ser quantificada. A mesma condição de contorno “adiabático” foi empregada no chão da sala, pois essa face não está em contato direto com o solo, mas sim um andar acima da sala de utilidades. A Tabela 2 mostra um resumo das condições de contorno que foram utilizadas para a simulação numérica.

Tabela 2: Resumo com as condições de contorno que foram utilizadas para a simulação numérica

Superfície	Condição de contorno	Exposto ao Sol?	Exposto ao vento?
Parede Oeste	Adiabático	Não	Não
Parede Leste	Superfície externa	Sim	Sim
Parede Sul	Superfície externa	Sim	Sim
Parede Norte	Superfície Interna	Não	Não
Chão da Sala	Adiabático	Não	Não

Relativamente à quantidade de zonas, foi definido que haveria uma zona térmica apenas. Isso deve-se ao fato de que foram adotadas as seguintes hipóteses para simplificação do problema e a possibilidade de conseguir modelá-lo:

- 1º - As taxas de dissipação de calor por Efeito Joule foram consideradas as mesmas para todos os painéis.
- 2º - As vazões dos difusores foram consideradas iguais por toda a extensão da sala de painéis.
- 3º - A temperatura em diferentes pontos da sala de painéis é a mesma sobre toda sua extensão.

As rotinas de funcionamento dos equipamentos elétricos têm um grande impacto sobre os resultados que são obtidos da simulação numérica e merecem ser mencionadas. Ao verificar dados históricos sobre a quantidade média de tempo em que a linha esteve em funcionamento (termo esse também chamado de disponibilidade ou *uptime*), constatou-se que em aproximadamente 85% do tempo a linha esteve produzindo, parando apenas em caso de paradas preventivas ou corretivas de manutenção. Para simular esse tipo de condição em que a linha opera durante essa fração média de tempo diariamente, foi alterado o cronograma (*schedule*) de operação da linha de produção para que esta esteja ligada à 00h00 até às 21h00, a fim de simular esse comportamento. Dessa forma, o calor será dissipado pelos painéis durante apenas esse

período, estando desligados após às 21h00 e religados às 23h59. A Tabela 3 mostra como isso foi feito no software *EnergyPlus*.

Tabela 3: Quadro-resumo com as rotinas de funcionamento de Painéis elétricos, HVAC – Cooling e HVAC – Heating.

Rotina de funcionamento	Tempo ligado	Tempo desligado
Painéis elétricos	00h00 – 21h00	21h00 – 23h59
HVAC - <i>Cooling</i>	00h00 – 23h59	-
HVAC - <i>Heating</i>	-	00h00 – 23h59

3.4. POTÊNCIA E TIPO DE SISTEMA DE HVAC

O sistema de condicionamento de ar instalado que está sob estudo é um equipamento do tipo split externo com descarga vertical. As unidades condensadoras ficam na parte externa da edificação enquanto as evaporadoras ficam numa das extremidades da sala de painéis. A Figura 7 – retirada do manual do fabricante (TRANE) - mostra como é a referida unidade condensadora: Modelo TRAE200C2K2AA000.

O conjunto inteiro de HVAC possui uma potência estimada de aproximadamente 89kW. Além disso, ao verificar a capacidade dos ventiladores das unidades evaporadoras, esses são capazes de gerar uma vazão de ar 27.000 m³/h, ou seja, 22,5 m³/s. A Tabela 3 contém essas informações acima citadas relativas ao sistema.

Figura 7: Unidade condensadora Trane Modelo TRAE200C2K2AA000



Tabela 3: Resumo contendo as características principais do sistema de HVAC que será analisado.

Tipo de sistema de condicionamento de ar	Split externo
Potência aproximada do sistema	89 kW
Vazão de ar	27.000 m ³ /h ou 22,5 m ³ /s

3.5. CÁLCULO DA ENTALPIA DO AR

Para o cálculo da entalpia (h) pelo sistema de automação utiliza-se a temperatura (T) assim como o conteúdo de umidade (w). Segue abaixo a Equação (1), que é utilizada para determinação da entalpia tanto do meio externo quanto interno à edificação:

$$h = (1,005 + 1,88w)T + 2501,4w \left[\frac{J}{g} \right] \quad (1)$$

Aplicando-se a Equação (2) para determinação da pressão parcial de vapor (p_v) e a Equação (3) para precisar w , é possível utilizar a Equação 1 para calcular h . A pressão de saturação (p) é tabelada e p_v é calculada a partir da umidade relativa (ϕ) medida pelo sensor capacitivo.

$$p_v = \phi p_{sat} [kPa] \quad (2)$$

$$w = 0,622 \left(\frac{p_v}{p - p_v} \right) \left[\frac{kg(vapor)}{kg(ar)} \right] \quad (3)$$

3.6. INCLUSÃO DO CICLO ENTÁLPICO NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para que fosse possível avaliar o efeito do CE sobre o consumo total dispendido pelo sistema de condicionamento de ar da sala de painéis, durante um ano inteiro, foi inicialmente necessário proceder as simulações numéricas sem o ciclo economizador.

Em uma fase subsequente da modelagem, foi incluído o CE, dentro do grupo de opções existentes do software EnergyPlus “HVAC Template:System:UnitaryHeatPumpAirtoair” o campo que possibilita introduzir um ciclo economizador deve ser alterado para ser ativado com base na diferença de entalpia do meio externo e interno, de forma que essa é a medida que norteia a abertura ou não dos *dampers* para o meio externo. Além disso, é necessário informar ao programa que o sistema deve ser capaz de acionar o CE e em paralelo ligar os compressores a depender da quantidade de calor a ser retirada da sala.

Dado que o parâmetro que serve como referência para tomada de ar interno ou externo é a entalpia, é preciso trocar a opção “NoEconomizer” por “DifferentialEnthalpy” e manter a “NoLockout” como está para possibilitar o funcionamento dos compressores do sistema juntamente com o ar externo à edificação.

3.7. MATERIAIS EMPREGADOS NA EDIFICAÇÃO

Para selecionar os materiais para modelagem e posterior simulação numérica, foi determinado quais os materiais utilizados na construção da sala de painéis. Todas as propriedades dos materiais foram retiradas da NBR 15220. As quatro paredes foram assumidas como sendo de concreto de 15 cm de espessura, o teto possui uma camada de concreto de 15 cm um vão de 8 cm e mais uma pequena camada de gesso, as portas de emergência são feitas de chapas de metal intercaladas por um espaço com ar e, por fim, o chão um piso elevado são chapas de 2,5 cm de espessura de aço galvanizado. A Tabela 4 mostra a relação desses materiais.

Tabela 4: Relação de materiais que foi utilizado para modelagem da sala de painéis para a simulação numérica utilizando o software EnergyPlus.

Parte da edificação	Material	Espessura
Paredes	Concreto	15 cm
Piso	Aço galvanizado	2,5 cm
Teto	Concreto + Ar + Gesso	15 cm, 8 cm, 3 cm
Porta de emergência	Chapa de aço + Ar + Chapa de aço	2,5 cm, 4 cm, 2,5 cm
Porta de madeira	Madeira	5 cm

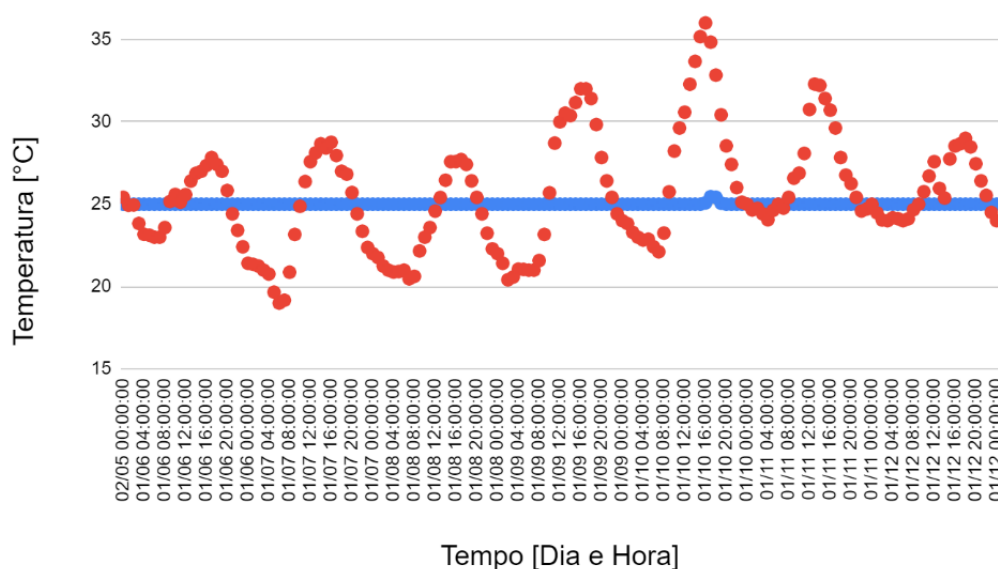
4. RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com e sem a utilização do CE. Inicialmente são mostrados os perfis de temperaturas e de potências e, por fim, a análise da viabilidade econômica da implementação desse sistema.

4.1. PERFIS DE TEMPERATURA, POTÊNCIA REQUERIDA E ENTALPIA

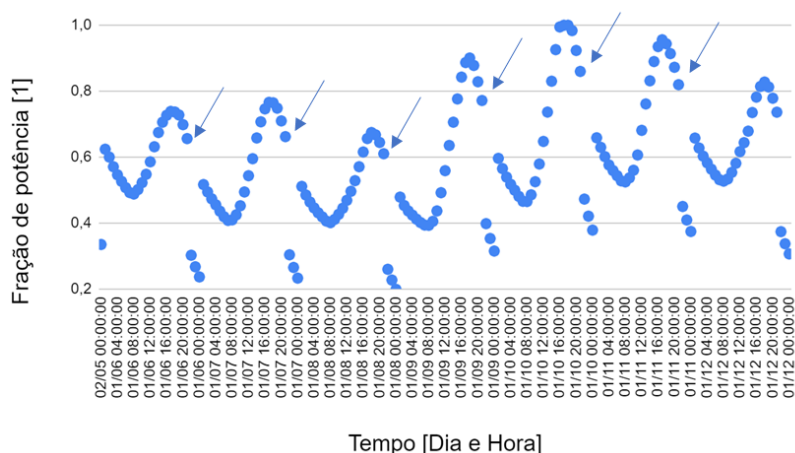
Procedeu-se uma verificação para duas situações distintas: uma semana típica de verão com geração de calor dentro da edificação, devido ao funcionamento dos componentes eletrônicos da sala de painéis com o CE operando, e uma semana de inverno com as mesmas condições. A Figura 8 representa o perfil de temperaturas interna e externa à sala de painéis para uma semana típica de verão, mais especificamente do dia 5 ao dia 12 de janeiro.

Figura 8 – Perfil das temperaturas durante uma semana típica de verão.
Em laranja as temperaturas externas e em azul as internas.
Foi analisado o período de 05 a 12 de janeiro.



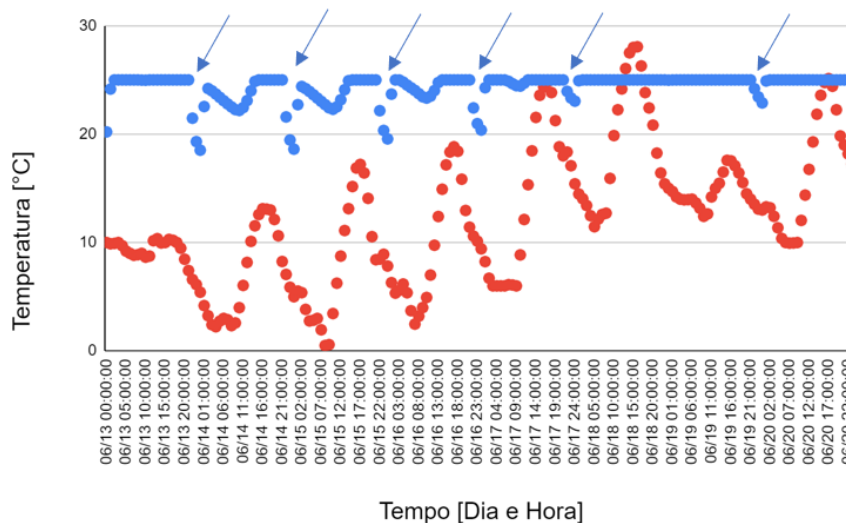
Como era de se esperar, durante o verão as temperaturas se mantiveram estáveis em 25°C devido ao fato de essa ter sido a temperatura de *setpoint* do sistema de condicionamento de ar. Para um maior entendimento do modo de funcionamento do sistema de HVAC, obteve-se resultados que evidenciassem a fração de potência que está sendo utilizada. Usando a base de dados proveniente das simulações numéricas, foram gerados os resultados referentes à potência do sistema de HVAC durante o verão, os quais estão representados na Figura 9. A escala de potência apresentada varia de 0 a 1, representando, respectivamente, a condição de sistema desligado e com potência máxima.

Figura 9 – Utilização da potência do sistema de condicionamento de ar uma semana típica de verão. Foi analisado o período de 05 a 13 de janeiro.



As setas em azul mostram o momento equivalente às 21h00 quando a potência que está sendo requerida pelo sistema diminui, uma vez que as máquinas são desligadas nesse horário e religadas apenas à 00h00. Foi obtido, também, o perfil de temperaturas de uma semana típica de inverno na Figura 10.

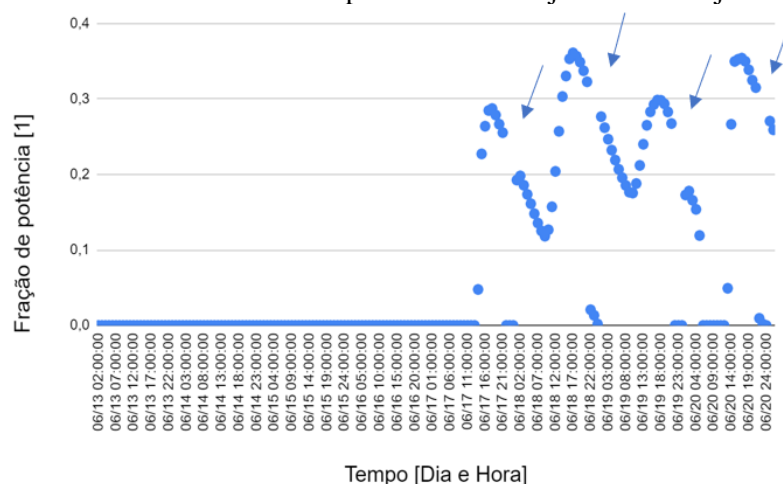
Figura 10 – Perfil de temperaturas durante uma semana típica de inverno. Em laranja as temperaturas externas e em azul, as internas. Foi analisado o período de 13 de junho a 20 de junho.



No período analisado durante o inverno houve uma alteração de temperatura apreciável. Conforme é possível ver na Figura 10, por volta das 21h00 (flechas azuis) a temperatura decresce de forma considerável no interior da sala devido ao desligamento das máquinas e, portanto, ao cessamento da dissipação de calor dos componentes eletrônicos dos painéis.

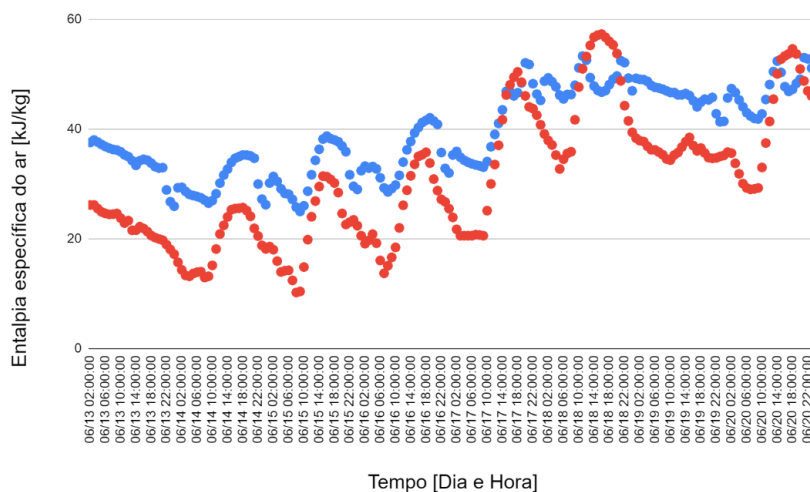
Da 00h00 em diante o comportamento é exatamente o oposto, ou seja, as temperaturas aumentam novamente, levando o sistema a ligar os compressores em alguns dias do período analisado, conforme pode ser visto na Figura 11, que mostra a fração de potência requerida pelo sistema de HVAC.

Figura 11 – Utilização da potência do sistema de condicionamento de ar durante uma semana típica de inverno. Foi analisado o período de 13 de junho a 20 de junho.



Existe um padrão que deve ser notado: de forma cíclica os compressores se apagam às 21h00 – flechas azuis da Figura 11– e são acionados novamente à 00h00. Pode-se observar a partir desses resultados que, diferentemente daquilo que ocorre durante o verão, são frequentes as situações em que as unidades compressoras do sistema de condicionamento de ar não são ligadas, mesmo durante os períodos em que há radiação solar incidindo diretamente sobre a edificação e geração de calor advinda dos painéis elétricos. Apesar desse cenário, bastou a utilização do CE para manter a sala dentro da temperatura esperada. A Figura 12 reforça isso e mostra que o CE fica operante quase todo o tempo durante essa semana típica de inverno, uma vez que os pontos da dispersão em vermelho (entalpia do ar externo) estão quase todos abaixo dos pontos azuis (entalpia do ar interno). Nos momentos em que o CE está acionado, o ar externo é insuflado para a parte interna da edificação, diminuindo a potência requerida pelos compressores e, em casos como o ilustrado na Figura 11, às vezes dispensa a necessidade de sequer ligá-los, bastando apenas a utilização do CE para manter a sala abaixo da temperatura de *setpoint*.

Figura 12: Entalpia do ar externo (pontos vermelhos) e interno (pontos azuis) à edificação durante uma semana típica de inverno. Foi analisado o período de 13 de junho a 20 de junho.



4.2. ANÁLISE DO CONSUMO E DA EFICIÊNCIA DO CICLO ENTÁLPICO

Ao analisar o sistema com e sem o ciclo economizador pode-se observar que é considerável a diferença nas potências requeridas pelos compressores nesses dois cenários distintos. No cenário em que o CE foi implementado, a potência média dos compressores foi de 32.811 W, ao passo que quando se opta por um sistema de condicionamento de ar convencional esse número subiu para 49.796 W, o que significa uma redução de potência de aproximadamente 34% de um em relação ao outro durante o curso de um ano. Foi possível constatar que o sistema está bem dimensionado levando em conta a sua potência nominal, pois foram pouquíssimas as iterações em que a potência do compressor ficou em 100%. Para ser mais exato, foi durante nove iterações, ou seja, 0,103% das vezes. Esse fato pode ser justificado por ser um período quente – janeiro – logo após os dias de “pré-aquecimento”, que são necessários serem feitos antes de ceder os resultados ao usuário. Algo relevante a ser levado em consideração é que os *dampers* do ciclo economizador ficaram abertos durante 43% do tempo, o que mostra que esse sistema realmente foi requerido e teve sua utilidade comprovada para essa aplicação na região geoclimática em que se encontra. A Tabela 5 mostra os resultados obtidos a partir da simulação numérica comparando os dois cenários: com e sem o CE.

Tabela 5: Resultados obtidos a partir das simulações numéricas durante um ano.

<i>Dampers</i> acionados	43% do tempo
Redução percentual de potência	34% de redução
Compressores a 100% da capacidade durante	0,103% do tempo
Consumo médio do sistema com C.E.	287,424 MWh
Consumo médio do sistema sem C.E.	436,212 MWh
Potência média economizada	148,788 MWh

4.3. VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DO CICLO ENTÁLPICO

Tendo estabelecido esse paralelo e em posse da informação de quanta energia será economizada anualmente – aproximadamente 148,788 MWh – é possível fazer o cálculo de retorno de investimento, utilizando o *payback* modificado, ou também chamado de descontado. Para calcular a quantidade de tempo requerida para receber de volta o dinheiro em decorrência da implementação desse projeto, utiliza-se o *payback* modificado e não o *payback* simples. Isso deve-se ao fato de que a inflação e volatilidade dos preços de energia no Brasil são grandes e que esse projeto irá se pagar ao longo de alguns anos, o que fará com que essa referida volatilidade nos preços da energia tenha influência sobre a economia final. Para determinar qual seria o investimento inicial necessário, foram realizadas cotações para: Painel de automação, cabos de sinal 4 e 8 vias, *dampers*, sensores de temperatura e umidade, serviços de automação do sistema e mão de obra para instalação física. Todos os esses produtos e serviços necessários para implementar o CE ficaram cotados em aproximadamente R\$ 150.000,00. A Tabela 6 mostra esses custos estimados.

Tabela 6: Desmembramento – por setor - dos custos relativos à implementação do CE.

Produto/ serviço necessário	Custo correspondente
Automação do sistema	R\$ 20.000,00
Painel de automação	R\$ 80.000,00
Dampers e atuadores	R\$ 25.000,00
Cabos de sinal	R\$ 20.000,00
Instalação do sistema	R\$ 5.000,00
Total	R\$ 150.000,00

Sabendo qual o preço da energia no mercado livre para o ano corrente (2022) que é de aproximadamente R\$ 0,36 por kWh, pode-se tomar a energia economizada no ano (148,788 MWh) e calcular a economia financeira anual advinda da utilização do CE e transformá-la, por meio de cálculos analíticos, no valor presente.

A taxa média de atratividade (TMA), que pode ser entendida como a taxa mínima que um determinado investidor pretende receber em um investimento, foi admitida como sendo 10% e, também, um aumento anual de 8% sobre o preço da energia no mercado livre, pode-se determinar a economia para os anos vindouros. A Tabela 7 apresenta o fluxo de caixa para o ano corrente (2022) e os anos seguintes. Nota-se que em amarelo (no ano 3) está o último período em que o fluxo de caixa acumulado ainda estava negativado. No ano subsequente (ano 4), o fluxo de caixa já é positivo, o que significa que os ganhos advindos desse projeto se igualaram ao investimento inicial entre esses dois anos.

Tabela 7: Fluxo de caixa durante quatro anos.

TMA = 10%						
<i>Período (n)</i>	0	1	2	3	4	5
<i>Balanço</i>	-	- 150.000,00	101.563,64	54.007,93	7.316,88	38.525,24
<i>Investimentos</i>	- 150.000,00	-	-	-	-	-
<i>Economia (R\$)</i>	-	53.280,00	57.542,40	62.145,79	67.117,46	72.486,85
<i>Valor presente (R\$)</i>	- 150.000,00	48.436,36	47.555,70	46.691,05	45.842,13	45.008,63
<i>F.C. Acumulado (R\$)</i>	-150.000,00	- 101.563,64	- 54.007,93	-7.316,88	38.525,24	83.533,88
Payback Modificado	3,16	Anos				

Como pode ser visto na Tabela 7, a quantidade de anos para que esse investimento inicial retorne à empresa e comece a efetivamente se traduzir em economia, ou seja, o seu *payback* é de 3,16 anos. Para ambientação, segundo uma pesquisa conduzida no Reino Unido a média dos valores de *payback* simples para vários projetos empreendidos no país foi de 2,83 anos (Drury, 1993). Outro aspecto muito importante e que deve ser levado em consideração quando se deseja definir se um investimento é atrativo ou não é definir a taxa interna de retorno, TIR. Esta é uma taxa de desconto hipotética que, quando aplicada a um fluxo de caixa, faz com que os valores de despesas, trazidos ao valor presente, seja igual aos valores dos retornos dos investimentos, também trazidos ao valor presente. A TIR para esse projeto foi calculada e ficou em aproximadamente 17%, ao passo que a TMA é de 10%.

Sabe-se que um método objetivo que existe para avaliar a viabilidade econômica de um projeto é por meio da comparação TIR/TMA. Caso a TIR seja maior do que a TMA, é dito que o projeto é economicamente viável, ao passo que, se ocorrer o contrário o projeto não é atrativo

financeiramente. Dado que, para esse caso, a TIR é maior do que a TMA, esse projeto é considerado economicamente viável, segundo esse critério.

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve por objetivo modelar uma sala de painéis elétricos existente em uma companhia produtora de Não tecidos para quantificar a economia de energia e de recursos em decorrência da implantação do ciclo economizador de energia. Esse ciclo em específico utiliza como parâmetro a entalpia do ar para economizar energia elétrica destinada para condicionamento de ar, baseando-se no conceito de *free cooling*.

Verifica-se com os resultados obtidos que o CE realmente teve sua aplicação comprovada, uma vez que opera durante 43% e do tempo ao longo de um ano, sendo a estação em que ele mais opera o inverno com utilização desse ciclo economizador durante 85% do período, ao passo que, no verão esse número cai para aproximadamente 1,1%. Relativamente ao *payback* obtido para esse projeto (3,16 anos), constatou-se que esse valor está próximo àqueles analisados por Drury referenciados na seção 4.3. Em se tratando do *payback* do CE, que foi calculado tendo em vista uma taxa mínima de atratividade de 10%, era esperado que esse valor ficasse um pouco mais elevado do que se comparado a um projeto calculado com a técnica de *payback* simples, devido à TMA.

Faz-se necessário colocar em perspectiva o quanto de energia foi economizada em razão da implementação desse ciclo economizador. Tomando-se por base dados do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, que afirma que o consumo médio de energia elétrica nas casas brasileiras é de aproximadamente 152,2 kWh/mês o que resulta em 1,826 MWh em um ano. Significa dizer que a implementação desse sistema para essa empresa em específico representou uma redução de aproximadamente o consumo energético de 81,6 casas brasileiras típicas. Essa análise baseia-se em dados obtidos através de pesquisa por amostragem, elaborada pelo PROCEL/Eletróbrás em 5625 residências, distribuídas em 18 Estados e o Distrito Federal, no ano de 2005, abrangendo 85,5% do território nacional.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros propõe-se verificar o *payback* desse mesmo sistema para diferentes localidades com condições climáticas distintas. Em se tratando de diferentes locais e climas, a dinâmica entre a entalpia interna e externa se modifica e com isso os resultados das simulações termo energéticas. Tomando-se a sala de painéis já confeccionada para o presente trabalho no *SketchUp* 2017 como sendo a sala de painéis padrão, bastaria imputar novos arquivos climáticos de outras localidades para saber quais são as regiões que apresentam um potencial maior de retorno sobre o investimento inicial. Isso tornaria viável estabelecer uma priorização sobre os investimentos que seriam realizados. É possível, portanto, elencar, os projetos de forma crescente de *payback*, de modo a evidenciar quais são as localidades mais adequadas para implementação desse tipo de sistema, e, logo, as que deveriam ter a sua implementação priorizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abint – Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos, Acessado em 23/04/2022 <<https://www.abint.org.br/>>

ABNT. “NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social”. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2003.

Altoé L, Costa JM, Oliveira DF, Martinez FJR, Ferrarez AH, Viana LA. Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. Dilemas ambientais e fronteiras do conhecimento II, Estud. av. 31 (89) Jan-Apr 2017. <<https://doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890022>>

Amado, E. A. “Free cooling potential for data centers in Brazil”. Tese (Mestrado) – **Departamento de Engenharia Mecânica**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2019.

Da Silva, MN. 2015, Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial, Trabalho elaborado no âmbito do contrato realizado entre a ELETROBRÁS/PROCEL e o consórcio EFFICIENTIA/FUPA, disponível em:
<https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/9/92/0_Eficiencia_energetica_sistemas_de_refrigera%C3%A7%C3%A3o.pdf>

DOE. “EnergyPlus Engineering Reference”. Manual de utilização do Software. **U.S. Department of Energy**, 2019.

Drury, C., “A Survey of Management Accounting Practices in UK Manufacturing Companies. Chartered Association of Certified Accountants, Londres, 1993.

Labee – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (2022), acessado em 24/04/2022
<<https://labeee.ufsc.br/node/480#:~:text=Observou%2Dse%20que%20o%20consumo,h%C3%A1%20grande%20varia%C3%A7%C3%A3o%20no%20pa%C3%ADs.>>

Lefley, F., “The Payback Method of Investment Appraisal: A Review and Syntesis”, International Journal of Production Economics, Elsevier, 1996.

Niemann J, Bean J, Avelar V. “Economizer modes of data center cooling systems”. Paris: Schneider Inc White; 2011 (Paper 132).

Potts, Z. “Free cooling technologies in data centre applications”. SUDLOWS White Paper, Manchester; 2011.

SILVA, Pedro Henrique de Oliveira; JANNI, Vanessa, “Relação de Taxa Mínima de Atratividade no Cenário Econômico Atual com a Viabilidade Econômica de Projetos”, Revista Boletim do Gerenciamento, Rio de Janeiro, 2021.

S. M. M. Oliveira, “O Uso das Técnicas de Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e Payback Descontado: Um Estudo de Viabilidade no Grupo Breda LTDA.”, 2015. Disponível em:
<<https://desafioonline.ufms.br/index.php/deson/article/view/1251/796>

Zhang, H., Shao, S., Xu, H., Zou, H., Tian, C. “Free cooling of data centers: A review”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 35, p. 171-182, 2014.