



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVA DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DA ENVOLTÓRIA DE CONTÊINER PARA USO COMO EDIFICAÇÃO MILITAR

Edmilson Magalhães de Deus

2022

CAMPO GRANDE|MS

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVA DO DESEMPENHO
TERMOENERGÉTICO DA ENVOLTÓRIA DE CONTÊINER
PARA USO COMO EDIFICAÇÃO MILITAR**

EDMILSON MAGALHÃES DE DEUS

Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Arthur Santos Silva, Dr. Eng. Civil

CAMPO GRANDE

SET / 2022

FOLHA DE APROVAÇÃO

Edmilson Magalhães De Deus

Otimização multiobjetiva do desempenho termoenergético da envoltória de contêiner para uso como edificação militar

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovada pela Banca Examinadora em 05 de Setembro de 2022, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Arthur Santos Silva, Dr. Eng. Civil – Orientador

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia - FAENG

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS

Prof. Dr. Marcio José Sorgato - membro interno

Universidade Tecnológica Federal do Paraná / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Vinícius Cesar Cadena Linczuk - membro externo

Universidade Federal da Fronteira Sul / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

AGRADECIMENTO

Aos professores e colaboradores do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Eficiência Energética e Sustentabilidade da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (PPGEES/UFMS/MEC – Brasil) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes), Código de Financiamento 001.

RESUMO

No âmbito da sustentabilidade, há uma grande preocupação com relação à redução do uso de materiais e da geração de resíduos da construção civil, e no âmbito da eficiência energética há preocupação na redução do consumo de energia sem afetar no conforto do usuário. De maneira a promover o reaproveitamento de contêineres marítimos para edificação, e juntando estes dois quesitos, o objetivo do trabalho é analisar o desempenho termoenergético de contêineres, para uso militar, com diferentes configurações construtivas e locais, utilizando métodos de otimização. O trabalho abrange aspectos de contratação por licitação para uso militar, considerando algumas localidades no Brasil, considera diversos parâmetros por meio de simulação otimizada da envoltória, com critérios de desempenho térmico e eficiência energética. Para isso, foi modelado um contêiner usando o programa EnergyPlus, com adaptações propostas por autores e regulamentos, considerando dados climáticos do INMET e configurações da INI-C (INMETRO, 2021). Foi feita a parametrização de variáveis utilizado o programa jEPlus, e para o processo de otimização foram utilizados análise de sensibilidade pelo método de Morris e o algoritmo NSGA-II, ambos no programa jEPlus+EA. Foram analisados os efeitos das seguintes variáveis independentes em dois climas distintos do Brasil: orientação ao eixo Norte; absorvância solar da cobertura e das paredes; espessura de isolante térmico das paredes; tipo de vidro das janelas; altura do contêiner; área de janelas; sombreamento de janelas e setpoint de climatização. Pela análise de sensibilidade pode-se constatar que os parâmetros variam conforme a localidade de estudo. Foram retirados da análise de otimização os parâmetros que apresentaram menor significância simultaneamente para as duas cidades: orientação em relação ao eixo Norte, transmitância dos vidros e altura do contêiner. Os resultados apontaram que as configurações para os melhores objetivos em cada cidade foram diferentes e isso expõem a preocupação que não se pode utilizar um contêiner projetado para uma cidade em outra cidade sem antes fazer análise termoenergética.

Palavras-chave: simulação computacional, otimização multiobjetivo, contêiner, jEPlus+EA.

ABSTRACT

In terms of sustainability, there is great concern about reducing the use of materials and the generation of civil construction waste, and in terms of energy efficiency, there is concern about reducing energy consumption without affecting user comfort. In order to promote the reuse of maritime containers for construction, and joining these two items, the objective of the work is to analyze the thermoenergy performance of containers, for military use, with different constructive configurations, by computer simulation, using optimization methods. The research covers aspects of contracting to bid for military use, considering some locations in Brazil, considering several variables through optimized simulation of the envelope, with thermal performance and energy efficiency criteria. For this, a container was modeled using the EnergyPlus software, with adaptations proposed by authors and regulations, considering climatic data from INMET and configurations from INI-C (INMETRO, 2021). For the parameterization of variables, jEPlus was used, and for the optimization process, sensitivity analysis by the Morris method and NSGA-II algorithm were used, both in the jEPlus+EA software. The effects of the following independent variables were analyzed in two different climate conditions in Brazil: orientation to the North axis; solar absorptance of the roof and walls; thickness of thermal insulation of the walls; type of window glass; container height; window area; window shading and thermostat setpoint. Through the sensitivity analysis, it can be seen that the parameters vary according to the location of implementation. The parameters that presented lower significance simultaneously for the two cities were removed from the optimization analysis: orientation in relation to the North axis, glass transmittance and height of the container. The results showed that the configurations for the best objectives in each city were different and this exposes the concern that one cannot use a container designed for one city in another city without first performing thermoenergy analysis.

Keywords: building simulation, multi-objective optimization, container, jEPlus+EA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emprego de uso de contêineres em hospital de campanha	17
Figura 2 – Reutilização de contêiner empregado na Missão de Paz, no Haiti, para escritório de obras.....	17
Figura 3 – Tipos de transformações de contêineres.	26
Figura 4 – Hierarquia com metas para se atingir o objetivo de economia de energia do Exército Americano.....	31
Figura 5 – Escala sétima utilizada para determinar a sensação térmico conforme PMV	33
Figura 6 – Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) em função do voto médio estimado (PMV).....	33
Figura 7 – Representação gráfica do modelo de <i>isolamento</i> de vestimentas <i>Dynamic clothing model</i>	36
Figura 8 – Zonas bioclimáticas segundo a NBR 15220-3:2005, com porcentagens abrangidas do território.....	39
Figura 9 – Representação em corte de um ambiente com a representação do ângulo vertical de sombreamento.....	41
Figura 10 – Exemplo de Análise de Sensibilidade pelo JEA para o método de Morris.....	49
Figura 11 – Esquema de acoplamento aplicado a otimização baseada em simulação	50
Figura 12 – Exemplo gráfico com a melhor solução de Pareto pela menor distância ao ponto utópico	52
Figura 13 – Procedimento de execução do algoritmo genético de otimização dentro de todo o processo	53
Figura 14 – Exemplo de Diagramas de Pareto	54
Figura 15 – Processo iterativo de otimização.....	55
Figura 16 – Contêiner utilizado para fins militar em campanha em módulo dual com placa solar	58
Figura 17 – Dados médios de temperaturas mensais e umidade relativa média de Campo Grande-MS e Boa Vista-RR, elaborados com arquivos climáticos “INMET 2018”	60

Figura 18 – Dados médios mensais de velocidade do vento e radiação horizontal global de Campo Grande-MS e Boa Vista-RR, elaborados com arquivos climáticos “INMET 2018”	61
Figura 19 Detalhe da veneziana inserida com a janela.....	64
Figura 20 – vista em planta de uma parede com suas camadas.....	65
Figura 21 – Temperaturas para dias típicos de verão e inverno em Campo Grande-MS....	70
Figura 22 – Valores de PPD e Temperatura externa para o ano inteiro de projeto para Campo Grande	71
Figura 23 – Detalhe de dois dias de inverno com PPD e Temperatura para Campo Grande-MS	72
Figura 24 – Temperaturas operativas para as 10 simulações	72
Figura 25 – Resultado das 10 simulações para Desempenho Térmico segund PPD.....	73
Figura 26 – Medidas de sensibilidade para o Objetivo t1 (Consumo de energia anual)	76
Figura 27 – Medidas de sensibilidade para a Percentagem de Desconforto térmico médio anual (Objetivo t2).....	77
Figura 28 – Medidas de sensibilidade para horas anuais de desconforto (Objetivo t3)	78
Figura 29 – Gráfico de Dispersão com objetivos t1 e t2 com classificação por setpoint (P11) para Campo Grande-MS.....	79
Figura 30 – Comparação dos objetivos t1 e t2 para os parâmetros P2, P3 e P11 para Campo Grande-MS	81
Figura 31 – Comparação dos objetivos t1 e t2 para os parâmetros P2, P3 e P11 para Boa Vista-RR.....	82
Figura 32 - Comparação dos objetivos t1 e t2 para os parâmetros P6, P9 e P11 para Campo Grande – MS.....	85
Figura 33 - Comparação dos objetivos t1 e t2 para os parâmetros P6, P9 e P11 para Boa Vista – RR.....	86
Figura 34 - Comparação dos objetivos t1 e t2 para os parâmetros P10, P11 e P12 para Campo Grande - MS	87
Figura 35 - Comparação dos objetivos t1 e t2 para os parâmetros P10, P11 e P12 para Boa Vista - RR.....	88

Figura 36 - Comparação dos objetivos t1 e t3 para os parâmetros P10, P11 e P12 para Boa Vista.....	89
Figura 37 - Comparação dos objetivos t2 e t3 para os parâmetros P10 e P11 para Boa Vista-RR.....	90
Figura 38 – Gráfico de coordenadas paralelas para Campo Grande, respectivamente, para o menor valor no objetivo t1, t2 e t3.....	91
Figura 39 - Gráfico de coordenadas paralelas para Boa Vista, respectivamente para o menor valor no objetivo t1, t2 e t3.....	91
Figura 40 – Imagem ilustrativa da web que pode ser exportada em formato de planilha ...	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dissertações defendidas por militares do Exército Brasileiro na área de Eficiência Energética	18
Tabela 2 - Quantidade de contêineres movimentados no Brasil.	22
Tabela 3 – Capacidade de transporte aéreo de contêineres	23
Tabela 4 – recomendações para envoltória de acordo com cada ZB.....	39
Tabela 5 – Valores referência para uso da tipologia Escritório.....	42
Tabela 6 – Valores de FF para contêineres de diferentes alturas de contêineres	58
Tabela 7 – Dados do local da pesquisa.....	59
Tabela 8 - Dados dos dias utilizados em projeto para verão e inverno para cidade Campo Grande-MS	62
Tabela 9 – Configuração da transferência de calor com o solo, por diferença finita – 1D .	62
Tabela 10 – Características dos materiais e das configurações utilizadas na construção dos modelos.....	63
Tabela 11 – Dados construtivos e emprego dos materiais:	65
Tabela 12 – Rotinas de ocupação e operação utilizadas nas simulações.....	66
Tabela 13 – Parâmetros a serem analisados totalizando 16.777.216 possibilidades.....	67
Tabela 14 – Valores relativos das nove variações em relação ao contêiner_0.....	74
Tabela 15 – Valores máximos e mínimos por objetivos e por cidade.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABraTeC	Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
CBC	Câmara Brasileira de Contêineres
EB	Exército Brasileiro
EEE	Eficiência Energética de Edificações
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INI-C	Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Técnica Brasileira
NR	Norma Reguladora
NSGA	Non-denominated Sorting Genetic Algorithm
RTQ	Regulamento Técnico da Qualidade
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i>
ZB	Zonas Bioclimáticas

SUMÁRIO

1.	Introdução	14
1.1.	Objetivos	18
1.1.1.	Objetivo Geral	18
1.1.2.	Objetivo específico.....	18
1.2.	Justificativa	18
1.3.	Estrutura do trabalho.....	20
2.	Revisão bibliográfica	21
2.1.	Contêiner ou <i>container</i>	21
2.1.1.	Uso de contêiner como edificação	23
2.1.2.	Aquisição pelo Exército	29
2.2.	Eficiência Energética no Exército Brasileiro	30
2.3.	Conforto e Desempenho Térmicos	32
2.4.	Regulamentos de conforto e desempenhos térmico e energético no Brasil	38
2.4.1.	ABNT NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações	38
2.4.2.	ABNT NBR 15.575 - Edificações habitacionais — Desempenho.....	40
2.4.3.	Instrução Normativa para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)	41
2.4.4.	ABNT NBR 16.401 – Instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitários	43
2.4.5.	Outros regulamentos	45
2.5.	Análises computacionais de edificações	46
2.5.1.	Simulação	46
2.5.2.	Análise de sensibilidade	47
2.5.3.	Otimização multiobjetiva	50
2.6.	Considerações finais sobre a revisão da literatura	56
3.	MÉTODO	57

3.1.	Estudo de caso.....	57
3.1.1.	Caracterização do objeto – contêiner de 20’	57
3.1.2.	Caracterização do local da pesquisa.....	58
3.2.	Configurações da simulação computacional.....	62
3.3.	Avaliação do desempenho do contêiner	66
3.4.	Simulação computacional	66
3.4.1.	Análise de sensibilidade	67
3.4.2.	Otimização	68
3.4.3.	Funções-objetivo	68
3.5.	Análise de resultados	68
3.6.	Considerações	68
4.	Resultados.....	70
4.1.	Análise do contêiner por simulação e modificações simplificadas	70
4.2.	Análise de sensibilidade pelo método de Morris	75
4.3.	Otimização por NSGA II	80
5.	CONCLUSÃO.....	94
5.1.	Limitações do trabalho.....	95
5.2.	Trabalhos futuros	95
5.3.	Recomendações para órgãos públicos	95
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
7.	APÊNDICES.....	108
7.1.	APÊNDICE A – Análise de alguns editais de compra / locação de contêineres	108

1. INTRODUÇÃO

Viana et al. (2019) relataram que a construção civil convencional consome a maior parte dos recursos naturais do planeta e é a maior responsável pela geração de resíduos sólidos no mundo. Segundo CBIC (2014), se estima que no Brasil há mais geração de Resíduo gerado na Construção e Demolição (RCD) do que lixo comum.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública (ABRELPE)¹ apresentou que foram coletados no Brasil 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em 2019 e, em comparação com o ano de 2010, houve um aumento de 33%. Deste total, 44,5 milhões de toneladas são oriundas de construção e demolição (56%).

Para Gomes et al. (2021), quando os resíduos da construção civil não possuem destinação adequada há consequências negativas ao meio ambiente e à população como um todo, especialmente quando depositados em vias públicas, prejudicam pedestres, a circulação de automóveis, a drenagem urbana, dentre outras coisas. Os autores também mostraram que os materiais mais desperdiçados nos canteiros são o concreto, a argamassa e o gesso. Em transporte, destacaram que o tijolo e a cerâmica são os mais desperdiçados. Notadamente, estes materiais são utilizados de maneira bastante manual ainda nos canteiros e de forma mal planejada.

Esses trabalhos apontaram uma preocupação com a grande quantidade de resíduo gerado na construção civil, e que tem sido um dos motivos para que vários pesquisadores busquem métodos alternativos para construções, pautados na sustentabilidade, principalmente para as efêmeras.

Paralelo a isto, Mussnich (2015) relatou que há uma quantidade grande de contêineres que atingem o fim da vida útil de transporte e ficam aguardando destinação em áreas portuárias:

“...no Brasil, há uma grande disponibilidade de containers em regiões portuárias, que se acumulam em extensos depósitos não operacionais. Estes são configurados como um problema para o entorno, no entanto, podem apresentar um grande potencial quando vistos como recurso material para a arquitetura, pois a maioria destes, após o fim de sua “vida útil”, é descartado, podendo ser adquirido por preços bastante reduzidos.”

¹ <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>

Em relação a isso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010b), têm como objetivos a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e, por fim, a disposição final dos rejeitos de uma maneira ambientalmente adequada.

Neste sentido, Musssnich (2015) e Giriunas et al. (2012) apontaram a adaptação de contêiner, para uso como edificação, como uma possibilidade de solução limpa (menos geradora de resíduos) quando comparada a outros sistemas. Esta solução dá nova utilização aos contêineres inutilizados nos portos e diminui o consumo de materiais da construção civil convencional.

Para Atmaca et al. (2017) e McConnel et al. (2019), que analisaram alguns aspectos principais sobre a avaliação do ciclo de vida do contêiner, foi constatado que é na fase de uso e operação que se deve haver um maior esforço na economia de energia. Também afirmaram que este tipo de equipamento é muito bom para pronto emprego em caso de catástrofes.

Em relação à energia elétrica, no Brasil, 51,2% do total consumida é em edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas (EPE, 2021). Nesse cenário, o Brasil se comprometeu, no Acordo de Paris assinado em 2016, em alcançar 10,0% de ganhos de eficiência energética no setor elétrico até 2030. Para tanto, pretende implementar ações para melhorar a eficiência dos equipamentos elétricos, os hábitos de consumo de eletricidade e políticas públicas de eficiência energética (CBIC, 2017). Tais ações são corroboradas por Mescolotto (2010), que reforça que isso também contribui com o desenvolvimento sustentável do país, além de evitar a necessidade de maior geração de energia elétrica no curto prazo.

De maneira complementar ao aspecto ambiental, merece destaque a importância de se garantir conforto térmico aos ocupantes dos ambientes nas edificações. Sabe-se, desde a década de 1960 com os estudos de Fanger (1970), que o conforto térmico depende de algumas variáveis como a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a velocidade do ar, a umidade relativa do ar, a taxa de metabolismo do ocupante e seu nível de vestimenta. Além disso, de acordo com o método adaptativo (DE DEAR; BRAGER, 2002), o intervalo admissível de conforto térmico humano depende da variação da temperatura de bulbo seco externa, o que variará para cada localidade e hora do dia. Tal cuidado visa a prevenir

problemas de saúde (ORMANDY et al., 2012), garantir segurança no trabalho (BRASIL, 2019) e melhorar o desempenho funcional (AWANG et al., 2018).

Entretanto, Elrayies (2017) e Viana et al. (2019) relataram a baixa quantidade de publicações práticas para especificação técnica de revestimento térmico para adequação dos contêineres para uso como edificações em climas quentes. Esta deficiência de especificações pode gerar um consumo de energia para climatização maior do que o necessário, visto que estes equipamentos não foram projetados para uso como edificação, principalmente em locais como climas rigorosamente frios ou quentes.

Neste contexto, está o Exército Brasileiro, que, em suas missões subsidiárias, atribuídas pela Lei Complementar 97, de 9 de junho de 1999, apoia a Defesa Civil em situações de catástrofes, e outros órgãos, em obras de engenharia e Missões de Paz (BRASIL, 1999). Nestes casos, a instituição tem utilizado, também, contêineres, como hospital de Campanha, para atender casos de epidemias; em ações humanitárias, como é o caso da Operação Acolhida² em Roraima; e em obras de estrada com empregos de batalhões de engenharia de construção.

Viana et al. (2019) relaram vários exemplos relacionados a este emprego militar com a utilização de edificações temporárias. Santos (2017) apresentou um hospital de Campanha, que pode ser utilizado tanto em guerra quanto em apoio em caso de catástrofes. No estudo, foram adaptados contêineres para um consultório odontológico, laboratório de análises clínicas, enfermaria, dentre outras funções (Figura 1). Há exemplos de utilização de contêineres em canteiros de obras em trabalhos da engenharia também, como mostrado na

Figura 2, no caso da Missão de Paz no Haiti³.

² A Operação Acolhida foi criada em março de 2018, pelo governo brasileiro, para atender ao grande fluxo migratório proveniente da Venezuela, baseada em três pilares: ordenamento da Fronteira, Abrigamento e Interiorização. Fonte: <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/acolhida/sobre-a-operacao-acolhida-2>> acessado em: 16 JUN 22.

³ Criada pelo Conselho de Segurança das Nações Unidas em 30 de abril de 2004 e durou 13 anos. Participaram aproximadamente 37.000 militares de 15 países, sendo cerca de 30.000 somente do Exército Brasileiro. Foram enviados mais de 30.000 soldados brasileiros. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2017-05/apos-13-anos-missao-no-haiti-comandada-pelo-brasil-se-aproxima-do-fim>>. Acessado em 16 JUN 22.

Figura 1 – Emprego de uso de contêineres em hospital de campanha



Fonte: Santos (2017)

Figura 2 – Reutilização de contêiner empregado na Missão de Paz, no Haiti, para escritório de obras



Fonte: Jornal Folha do Progresso⁴ (01/12/2018)

Por fim, verifica-se que o contêiner construído para transporte de mercadorias pode ser utilizado para uso humano, principalmente para situações temporárias. Porém, como não foram projetados para tal, requer estudo para retificar ou ratificar principalmente sua envoltória com relação ao conforto humano e consumo de energia elétrica. Fonseca et al. (2017) apresentaram que o estudo ainda na fase de projeto, através de simulação termoenergética, é um meio promissor para de edificações. Destacaram que esta análise depende da integração de múltiplos objetivos para se alcançar um bom desempenho. Neste contexto, Deb (2002) menciona as técnicas de otimização em modelos de engenharia tem apresentado boas soluções, e será o objetivo deste trabalho analisar em contêineres para uso militar no Brasil.

⁴ “Força-Tarefa da BR-163/PA monta escritórios de apoio em contêineres usados no Haiti” – Disponível em < <https://www.folhadoprogresso.com.br/forca-tarefa-da-br-163pa-monta-escritorios-de-apoio-em-containeres-usados-no-haiti/> >.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar, por otimização, envoltórias de um contêiner com adaptações para uso como edificação militar, de maneira a minimizar o consumo energético e maximizar o desempenho térmico, em diferentes climas do Brasil.

1.1.2. Objetivo específico

Para cumprir o objetivo geral, foram estipulados os seguintes objetivos específicos:

- Formular diferentes configurações e propriedades construtivas aplicáveis ao contêiner, disponíveis no mercado nacional;
- Analisar o consumo de energia elétrica e o desempenho térmico em contêineres, por simulação computacional;
- Realizar otimizações multiobjetivas da envoltória do contêiner, considerando diferentes configurações levantadas, para diferentes climas;
- Apresentar recomendações técnicas, ao Exército Brasileiro, para uso em licitações de compra ou locação de contêineres.

1.2. Justificativa

Em um levantamento sobre estudos recentes de militares na área de eficiência energética, verificou-se que o Exército Brasileiro tem se aprofundado no assunto, conforme as pesquisas concluídas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dissertações defendidas por militares do Exército Brasileiro na área de Eficiência Energética

Autor	Trabalho	Ano	Local
Marcus Vinicius de Paiva Rodrigues	Avaliação Da Eficiência Energética De Edificações Residenciais em fase de Projeto: Análise De Desempenho Térmico pelo Método Prescritivo e por Simulação Computacional Aplicados a estudo de caso de Projeto-Tipo do Exército Brasileiro	2015	Unicamp
André Cruz Teixeira	Processo de Etiquetagem de Projetos de Obras Militares para Eficiência Energética e Certificação Procel utilizando Modelagem da Informação da Construção	2018	IME
Marcus do Nascimento Rachid	Implementação da Eficiência Energética em uma Edificação Militar do Exército Brasileiro	2018	UFMS
Adelmo Benevides De Santana Júnior	Implantação e Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos junto ao Comando Militar Do Oeste	2019	UFMS
Breno Pontes Pimentel	Etiquetagem Energética de Edificação do Exército Brasileiro pela INI-C	2020	UFMS

Autor	Trabalho	Ano	Local
Luiz Pereira Da Silva Neto	Instalações Militares de Energia Zero: Avaliação Técnica para Quartéis do Exército Brasileiro com Sistemas Fotovoltaicos e Sistemas de Armazenamento de Energia	2021	UFMS

Como complemento aos estudos apresentados, há uma lacuna sobre o uso de contêineres como edificação, os quais mostram boas vantagens devido à sua versatilidade em se transformar em escritórios e/ou alojamentos. O contêiner possui uma padronização internacional pela *International Organization for Standardization (ISO)*, através da ISO 668:2020 - *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings* (ISO, 2020), para tamanho e resistência. Também possui alta disponibilidade comercial no Brasil, tendo em vista que há maior demanda de importação com esse meio de transporte do que exportação. Com relação ao seu emprego original (transporte marítimo), este equipamento tem a vida útil relativamente curta quando consideramos a finalidade de grande número de empilhamento, mas o material e a estrutura têm uma boa vida útil (VIANA et al., 2019). Este equipamento também possui maior facilidade de transporte do que os barracões convencionais de obra. Por fim, em relação às suas vantagens, deve-se destacar o curto intervalo de tempo para torná-lo adequado para outro fim.

Contudo, na contramão destas vantagens, tem-se uma lacuna em termos de manuais e especificações técnicas para utilização e aquisição de contêineres para uso como edificações, com atenção ao desempenho térmico e à eficiência energética, conforme Especificação Técnica encontrada em um dos editais pesquisados no site de compras governamentais apresentados no Apêndice A deste trabalho, e que vai ao encontro a ao estabelecido na Lei das Licitações, que exige que as licitações devem garantir a “promoção do desenvolvimento nacional sustentável” (BRASIL, 1993).

Destaca-se que estes equipamentos, em seu estado para transporte marítimo, são basicamente compostos de uma envoltória (paredes, piso e cobertura) metálica, sem cuidados para o isolamento térmico. Outro fato que merece destaque é a possibilidade de o Exército Brasileiro empregar o mesmo equipamento em zonas bioclimáticas diferentes, como foi o caso do emprego de contêiner utilizado no Haiti sendo usado depois no interior do Pará para uma obra rodoviária (Figura 2).

Por estes motivos, para melhor aproveitar os contêineres disponíveis no Brasil, esta pesquisa analisará parâmetros para torná-los mais eficientes energeticamente, levando em consideração critérios ambientais, térmicos e fácil adaptabilidade, com emprego de técnicas

de simulação termoenergética e otimização, considerando diferentes variáveis e zonas bioclimáticas do Brasil.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução, com objetivos e justificativa.

No segundo capítulo há uma revisão bibliográfica sobre contêineres e o uso como edificações, trabalhos sobre eficiência energética no Exército Brasileiro, conforto e desempenho térmico principalmente em climas quentes, normas e regulamentações nacionais, simulação computacional e otimização multiobjetivos na área de projetos na construção civil.

No terceiro capítulo é apresentado o método, contemplando um estudo de caso, apresentando o local, seus dados climáticos e o modelo de contêiner, como objeto de melhoramento da edificação. É feita, também, a apresentação das variáveis utilizadas na simulação e otimização, e como será feita a análise de sensibilidade para tornar o processo computacional menos oneroso e custoso.

No quarto capítulo é feita a apresentação dos resultados obtidos com o método apresentado, contendo tabelas, gráficos e as discussões.

No quinto capítulo tem-se a conclusão contendo os aspectos mais importantes obtidos no trabalho. Após, têm-se as referências bibliográficas e, como apêndices, foram incluídos o artigo publicado em um congresso e conjunto de informações de especificações técnicas encontradas em editais para aquisição ou locação de contêineres.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o devido embasamento teórico, este capítulo contém: um breve histórico sobre contêiner e seu uso como edificações; estudos de eficiência energética no Exército Brasileiro, estudos sobre conforto e desempenho térmico e desempenho energético, os principais regulamentos e normas vigentes na área de desempenho térmico e eficiência energética de edificações no Brasil; e pesquisas sobre simulações em projetos de edificações.

2.1. Contêiner ou *container*

A palavra contêiner é adaptada de *container*, em inglês, conforme o Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa⁵. Sendo assim, é comum encontrar em pesquisas tanto “contêiner” quanto “*container*”.

Os modelos de contêineres mais utilizados no transporte marítimo são os de 20’ e 40’. O container de 20’, referido como *Twenty-foot Equivalent Unit* (TEU), tornou-se a referência padrão como volume de carga e até capacidade dos navios de transporte. O container de 40’, portanto, refere-se a 2 TEU.

Os contêineres são padronizados mundialmente pela ISO 668 (2020) - *Series 1 freight containers - Classification, dimensions and ratings*. Com isso, os contêineres padronizados universalizam seu uso, com controle das dimensões, resistências mínimas, testes necessários, tolerâncias aceitáveis, terminologia e até mesmo identificação. Em 1971 foi padronizado no Brasil, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e em 1977 foi criada a Câmara Brasileira de Contêineres (CBC)⁶. Atualmente, no Brasil está vigente a ABNT NBR ISO 6346:2002 - Contêineres de carga - Códigos, identificação e marcação (ABNT, 2002) e estão canceladas as normas: ABNT NBR 5943:1984 - Contêiner – Tipos (Cancelada em 05/08/2010), ABNT NBR 5978:1980 – Contêiner – Padronização (Cancelada em 05/08/2010) e ABNT NBR 5979:1980 - Contêiner – Terminologia (Cancelada em 05/08/2010).

As principais dimensões padronizadas pela ISO 668 (2020) são em pés (’) e a largura é limitada a dimensões de transporte rodoviário (8’). A NBR ISO 6346 (ABNT, 2002) trata de vários outros comprimentos (10’, 20’, 30’, 40’, 45’), alturas (4’, 8’, 8’6”, 9’, 9’6”) e tipos

⁵ <https://voc.iilp.cplp.org/index.php?action=von&csl=br> acessado em 01 AGO 2021

⁶ <http://cbccontainer.org.br/a-camara/> acessado em 01 AGO 2021

(para uso geral sem ventilação ou com ventilação, pressurizado ou não, especializado para transporte de animal, refrigerado, teto aberto, tanque).

A quantidade de contêineres movimentados nos principais portos do Brasil nos três últimos anos é mostrada na Tabela 2, segundo a Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres (ABraTec). Nestes três últimos anos, o Porto de Santos movimentou, em média, 40% do total de contêineres no país. De acordo com a ABraTec, o aumento do número de movimentações se deu pela melhoria da eficiência operacional dos terminais dado pelo investimento em obras civis, aquisição de equipamentos mais modernos e especialização de mão de obra.

Tabela 2 - Quantidade de contêineres movimentados no Brasil.

PORTO	2018	2019	2020
Santos	2.594.811	2.586.082	2.656.340
Itajaí	643.017	688.514	786.998
Paranaguá	461.468	486.134	551.670
Rio de Janeiro	453.147	417.400	401.205
Rio Grande	448.975	403.783	404.721
S. Fco. do Sul	360.087	423.106	336.098
Manaus	336.864	380.481	324.446
Suape	275.020	284.071	293.184
Itaguaí	247.077	160.728	150.645
Salvador	203.978	205.222	211.693
Vitória	162.015	173.535	177.557
Pecém	156.714	213.122	182.511
Vila do Conde	80.861	87.479	99.980
Fortaleza	63.261	40.577	22.427
Imbituba	60.025	47.784	36.782
Natal	17.269	24.295	18.257
Porto Velho	1.688	3.182	1.729
Belém	107	0	1
Outros	30.811	34.383	28.018
Brasil	6.566.384	6.659.878	6.684.262
PORTO	2018	2019	

OBS¹: A movimentação de Navegantes está incluída no porto de Itajaí.

OBS²: A movimentação de Itapoá está incluída no porto de São Francisco do Sul.

Fonte: Abratec⁷

⁷ Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres < <https://abratec.terminais.org.br/estatisticas> >. Acesso em 24 de julho de 2021.

Pelo relatório estatístico mensal de dezembro de 2020 de Santos Port Authority⁸, do total de 2.656.340 unidades do acumulado do ano de 2020, são considerados apenas contêineres de 20' e 40' e somam os valores de importações (50,3%) e exportações (49,7%). Para o contêiner de 20', o número de importações (544.520) supera o de exportações (536.114) em 8.406 unidades. O contêiner de 40', apesar de superar em números absolutos o contêiner de 20', o valor relativo entre o número de importações (791.676) e exportações (784.030) é menor (7.646), ou seja, sobraram mais contêineres de 20'.

Outro fator da escolha da escolha pelo contêiner de 20' é a maior facilidade de transportá-lo, tanto por rodovia quanto por via aérea utilizando helicópteros. Segundo a ISO 668 (2000 apud CARBONARI 2015) o contêiner 20' possui 2,33 t de peso próprio e o contêiner 40' tem 3,55 t. Atualmente o Exército Brasileiro conta com uma frota de helicópteros capazes de transportar este tipo de carga, conforme Tabela 3, além de transporte terrestre por caminhões pranchas.

Tabela 3 – Capacidade de transporte aéreo de contêineres

Modelo	Carga útil	Quantidade⁹
Sikorsky UH-60 (Black Hawk)	4100 kg*	3
Eurocopter AS532 Cougar	4650 kg**	9
Eurocopter EC725 (Super Puma)	5670 kg***	16

Fonte: * https://pt.wikipedia.org/wiki/Sikorsky_UH-60;

** https://pt.wikipedia.org/wiki/Eurocopter_AS532_Cougar

*** https://pt.wikipedia.org/wiki/Eurocopter_EC725

Nesta tabela há um número significativo de helicópteros com capacidade de transportar, com limite razoável de segurança em relação à capacidade de carga, os contêineres de 6,0m de comprimento.

2.1.1. Uso de contêiner como edificação

O relato da primeira patente com métodos para transformar contêineres marítimos em habitações remete a Philip C. Clark (Miami, Fl, EUA), que em 23 de novembro de 1987 fez o pedido sob número 4854094 com o seguinte objeto: “*Method for converting one or more steel shipping containers into a habitable building at a building site and product thereof*”. Esta patente foi emitida em 8 de agosto de 1989¹⁰. O autor descreveu que poderiam

⁸ Disponível em <http://intranet.portodesantos.com.br/docs_codesp/doc_codesp_pdf_site.asp?id=131274>. Acessado em 01 AGO 2021/

⁹ **World Air Forces 2020**. Disponível em: <<https://www.flightglobal.com/reports/world-air-forces-2020/135665.article>>.

¹⁰ Disponível em: <<https://patents.justia.com/patent/4854094>> acessado em 06 Nov 2021

ser utilizados um ou mais módulos, e, nesta última situação, poderiam ser juntos ou espaçados (lado a lado) ou uns sobre os outros. O autor mostrou, ainda, a inclusão de telhado, abertura de porta e janelas através de rasgos nas paredes do contêiner, além de forro interno e piso. O autor apresenta a inclusão de isolamento externo com uma camada resistente às intempéries. Há também a indicação de uma camada isolante interna e com uma camada decorativa após.

O uso de contêineres para edificação iniciou como abrigos temporários em países que sofreram desastres naturais ou em guerras, como na Guerra do Golfo em 1991, onde também serviram como transporte de prisioneiros iraquianos (METÁLICA, 2015 apud GUEDES; BUORO, 2015).

Dara et al. (2019) destacaram que os módulos possuem boa resistência estrutural, resistência ao fogo e robustez para suportar intempéries. Com relação à reciclagem, apresentaram que um contêiner de 40' tem 3.700 kg de aço e requer aproximadamente 8.000 kWh de energia para derretê-lo e reutilizar o aço. Em contrapartida, apresentaram várias citações de adaptações de contêineres com baixo consumo de energia e que a construção modular em contêiner tem ciclo de vida mais vantajoso do que a modular em madeira, quando se considera vida útil de 50 anos.

Buges et al. (2014) relataram que a transformação de contêineres em edificações tem se tornado uma solução mais limpa e simples do que os outros sistemas construtivos tradicionais. Citaram autores que relataram que os contêineres possuem boa capacidade estrutural, modular, resistência à chuva, ao fogo e intempéries, necessitando, porém, da análise do desempenho térmico do seu envelope.

Islam et al. (2016) relataram que os contêineres não se mostraram inferiores, em termos de condicionamento térmico, às construções convencionais para um clima tropical quente e úmido em dias quentes, desde que devidamente projetados, isto é, adaptados para tal. Relataram também que, utilizando os materiais de bom desempenho ambiental, tais construções podem ser consideradas eficientes energeticamente e sustentáveis. Os autores ainda reforçaram a justificativa do alto custo para o retorno dos contêineres vazios quando se comparado à produção de outros novos contêineres na Ásia, já que grande parte dos contêineres é fruto de negociações entre Ásia e países ocidentais.

Viana et al. (2019) relataram que vários autores analisaram o uso de contêineres de forma temporária em áreas afetadas por terremotos e/ou inundações (CAIA;

VENTIMIGLIA; MAASS, 2010; ABULNOUR, 2014; HONG, 2017 apud VIANA et al., 2019) e também para postos militares, banheiros públicos e quiosques (PEÑA; SCHUZER, 2012; ELRAYIES, 2017 apud VIANA et al., 2019).

Abulnour (2014) apresentou que o assentamento temporário pode ser um complexo urbano formado por serviços para educação, saúde e etc., para atender à comunidade afetada por um desastre. Como ponto negativo, o autor apontou que a comunidade local não participa do processo de construção quando se utiliza casas pré-fabricadas. Como aspecto positivo apontou que os contêineres podem ser adaptados com união de duas ou mais unidades, além de possibilidade de inclusão de banheiros e telhado.

Hong (2017) apresentou vários modelos de casas temporárias com diferentes tipos de materiais e destacou que os contêineres têm adaptabilidade rápida e fornecem um uso alternativo para os contêineres que não são mais utilizados em transportes marítimos. Além disso, podem virar moradias definitivas para famílias que requerem pouco espaço. Por fim, seu uso pode contribuir para o desenvolvimento da industrialização da construção civil.

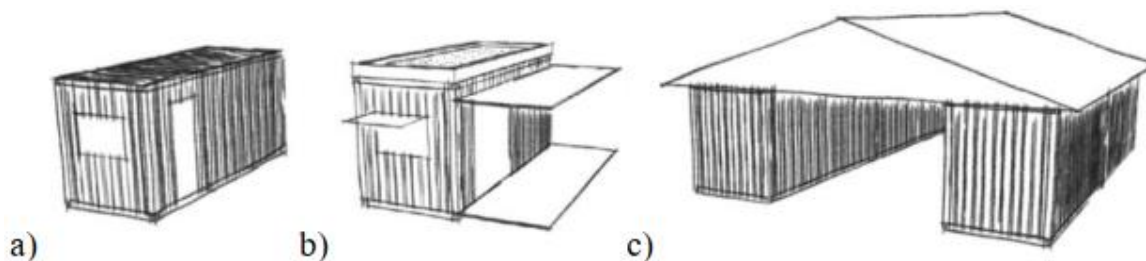
Peña e Schuzer (2012) destacaram a versatilidade do contêiner para ser organizado conforme as necessidades, a modularidade para utilizar as unidades, a facilidade de se construir em qualquer área, a transportabilidade, a habilidade e a possibilidade de ser reutilizado e renegociável.

Outro ponto é que o uso de contêiner evita o surgimento de mais uma construção convencional. Segundo a CBIC (2017), a redução dos resíduos da construção civil reduz o consumo energético relacionados ao processamento de matérias primas, construção e transporte. Uma pesquisa da EPE (2020) destacou a participação do cimento (um dos principais materiais de construção convencional, participando na parte de estrutura de concreto, argamassa de assentamento e revestimento de alvenaria) no consumo energético das indústrias e nas emissões de CO₂. Por fim o relatório destacou o impacto do setor da construção civil no transporte, principalmente rodoviário.

No Brasil, a utilização de contêineres como edifícios é recente. Segundo Metálica (2015 apud GUEDES; BUORO, 2015), em 2010 foi construída a primeira loja em contêiner para a empresa Container Ecology Store. A primeira residência construída em container foi em 2011, em São Paulo, pelo arquiteto Danilo Corbas, que propôs soluções práticas utilizando design e arquitetura de elevado nível de complexidade de uso, diferentemente do que acontecia no início do uso deste material como elemento construído.

Carbonari (2015) apresentou alguns exemplos de utilização no Brasil, destacando algumas das maiores obras comerciais, à época da sua pesquisa, tais como o hostel Tetrís (Foz do Iguaçu, com 15 contêineres), o restaurante Madero Container (oito unidades de beira de estrada no sul do país), dentre outros. A autora descreve também inúmeras formas de transformar o contêiner em unidade habitável, com opções como adaptação, expansão, organização espacial, conforme Figura 3.

Figura 3 – Tipos de transformações de contêineres.



Fonte: Carbonari (2015)

Guedes e Buoro (2015) apresentaram algumas vantagens e desvantagens de uso do contêiner como edificação.

a. Vantagens:

- 1) modularidade: são padronizados por norma ISO, pode ser simplesmente juntado com outro, ao lado ou mesmo sobreposto, que a estrutura suporta a carga;
- 2) disponibilidade: pode ser adquirido em qualquer parte do mundo, além do problema de logística reversa dos contêineres que não retornam para o país de origem;
- 3) boa resistência estrutural: podem ser empilhados porque foram projetados para transporte em navios;
- 4) boa resistência a intempéries: foram projetados para serem transportados sob intempéries marítimas;
- 5) recicláveis: são feitos predominantemente em aço;
- 6) reutilizáveis: por exemplo, como depósito de materiais na construção civil, o que economiza materiais primas básicas da construção: cimento, areia, tijolo, ferro;
- 7) menor intervenção no terreno: necessitam do uso de sapatas superficiais isoladas ou radier, na maioria das vezes, por ser uma edificação mais leve do que a convencional;
- 8) facilidade de transporte, uma vez que suas dimensões contribuem para o transporte rodoviário, aéreo ou marítimo;
- 9) construção mais industrializada, com mão de obra mais qualificada, o que diminui desperdícios de material e tem o tempo de construção mais controlado.

b. Desvantagens:

- 1) dificuldade de transporte em grandes centros ou regiões mais afastadas;
- 2) mão de obra mais especializada e, portanto, mais cara e mais escassa;
- 3) feita de material de alta condutividade térmica (aço), tornando necessária intervenção na envoltória com melhoramento de cobertura, isolamento de parede, solo, pintura, etc.
- 4) possibilidade de contaminação química, biológica ou por radiação, dependendo da carga transportada anteriormente.

Há, também, alguns cuidados específicos a serem considerados quando os contêineres são adaptados para edificações. Figuerola (2013 apud CARBONARI; BATH, 2016) recomendaram que ao se abrir vãos para esquadrias com medidas superiores a 1/3 do comprimento do contêiner há necessidade de reforços estruturais, que deverão seguir a NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Destacou também a necessidade de inspeção técnica para verificar riscos químicos, biológicos e físicos (e.g. radiações) devido à diversidade de transportes que eles possam ter sido submetidos, além de cuidado no transporte e içamento.

Reforçando os cuidados nas aberturas para esquadrias, Carbonari e Bath (2016) e Alves et al. (2019) enfatizaram que os recortes para esquadrias devem ser precisos e os requadros feitos com mesmo material para evitar corrosão eletroquímica. Após os recortes, ressaltaram a importância do tratamento abrasivo e pintura.

Silva (2018) apresentou um estudo de caso com 4 edificações em Ouro Preto-MG, onde as casas contêineres adaptadas por profissionais especializados tiveram clientes mais satisfeitos. A autora destacou que os principais motivadores para a escolha pelos contêineres foi o curto tempo de obra e o custo reduzido, mas houve relato de problemas com conforto térmico no período de calor. A autora sugeriu a inclusão de isolante térmico em todas as fachadas (a maioria dos trabalhos apresentados pela autora incluiu apenas na fachada norte) além de sombreamento nas fachadas que recebem radiação solar direta e cobertura adicional.

Gamarra (2020) apresentou que, antes de pensar em gerar energia para tornar o contêiner “energia zero”, deve-se reduzir notavelmente a demanda energética sem prejudicar o conforto ambiental, principalmente o térmico. Foram apresentados os dois modelos mais utilizados para quantificar o conforto térmico e suas características: o modelo de balanço de

calor e o modelo adaptativo. O primeiro se refere ao cálculo do Voto Médio Predito (*Predicted Mean Vote – PMV*), desenvolvido por Fanger (1970) e implementado para o conceito de Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (*Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD*). Como deficiência, o modelo não considera os indivíduos ativos, que podem adaptar as vestimentas ou o seu comportamento. No segundo, a temperatura de conforto varia de acordo com a temperatura externa (ASHRAE, 2017).

Gamarra (2020) apresentou também que, em relação à melhor orientação, estando a edificação no hemisfério Sul, tem-se a direção Norte, por ser mais fácil sombrear as aberturas nesta orientação. A orientação Sul também pode ser adequada por ter menos incidência da luz solar direta, em função da latitude local.

Buges et al. (2014) fizeram uma avaliação da eficiência energética da envoltória de contêineres para cada uma das oito zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15.220-3 (ABNT, 2005c). Os autores apresentaram que, apesar das configurações apresentarem baixos valores de transmitância térmica das paredes constituídas por chapa de aço ondulada, lã de vidro (fixado em 50 mm de espessura), câmara de ar e placa de gesso, elas ofereceram capacidade térmica muito inferior ao solicitado como pré-requisito para as Zona bioclimática (ZB) 1 a 7. Como alternativa, propuseram materiais de alto valor de densidade aparente e calor específico. Para a ZB 8 eles recomendaram atenção à ventilação e ao sombreamento das aberturas. Por fim, sugeriram a avaliação pelo método de simulação computacional.

Viana (2018), que analisou o desempenho térmico de uma residência feita com o acoplamento de dois contêineres, em nível, com ventilação natural, relatou que a cobertura complementar, que permite uma ventilação entre ela e a cobertura do contêiner, é melhor do que a cobertura verde, mas com a limitação de não ter considerado o efeito da evaporação de água pela vegetação e a contribuição desta perda de calor no balanço térmico da cobertura. Com relação à taxa de renovação de ar de 1 ren/h (quando a renovação é feita apenas por frestas) e 5 ren/h (quando a renovação é feita quando as aberturas estão completamente abertas), não foi constatada influência significativa. A autora também considerou o contêiner sobre fundação do tipo radier e sobre sapatas isoladas. Em seu trabalho, a autora relatou que o radier obteve melhor desempenho térmico no verão e no inverno pelo fato da maior área de contato com o solo. A autora também citou que a absorvância solar média na ZB 2 auxilia no inverno e não prejudica tanto no verão por ele ser considerado “mais ameno”, se comparado ao restante do Brasil.

Wang et al. (2018) relataram que os contêineres devem possuir um material mais reflexivo à radiação solar ou que a utilize para gerar energia. Mostraram também a possibilidade de utilização de células fotovoltaicas e meios de armazenamento (baterias), podendo torná-los edifícios de energia zero.

Giriunas et al. (2012) apresentaram problemas que podem acarretar à estrutura dos contêineres durante as adaptações destes equipamentos para edificações, principalmente com relação à atividade de carregamento padronizadas na ISO 1496-1 de 1990 atualizada em 2013.

Pela exposição, os contêineres têm boa aplicabilidade como edificação, inclusive como reutilização dos que já foram utilizados como transporte, requerendo técnicas de adaptação. A seguir, será verificado quesitos legais para aquisição por órgão públicos.

2.1.2. Aquisição pelo Exército

Conforme legislação vigente, o Exército deve adquirir ou locar contêineres conforme a Lei 8666/93 (BRASIL, 1993):

“Art. 1ª Esta Lei estabelece normas gerais sobre licitações e contratos administrativos pertinentes a obras, serviços, inclusive de publicidade, compras, alienações e locações no âmbito dos Poderes da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios.”

Destaca-se desta lei a preocupação pela promoção do desenvolvimento nacional sustentável e pela preferência de produtos manufaturados, que atendam a normas técnicas brasileiras (caput e inciso I do § 5º do art. 3º, respectivamente): “§ 5o Nos processos de licitação, poderá ser estabelecida margem de preferência para: I - produtos manufaturados e para serviços nacionais que atendam a normas técnicas brasileiras”.

Outro dispositivo legal a ser seguido para a aquisição desses bens ou contratação pela Administração Pública Federal direta, onde pode enquadrar tanto a aquisição quanto o serviço de adaptação ou locação destes equipamentos, é a Instrução Normativa Nº 01, de 19 de janeiro de 2010, da Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (SLTI/MPOG), que dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental nessas licitações (BRASIL, 2010a):

“Art. 4º Nos termos do art. 12 da Lei nº 8.666, de 1993, as especificações e demais exigências do projeto básico ou executivo, para contratação de obras e serviços de engenharia, devem ser elaborados visando à economia da manutenção e operacionalização da edificação, a redução do consumo de energia e água, bem como a utilização de tecnologias e materiais que reduzam o impacto ambiental, tais como:

[...]

VIII – utilização de materiais que sejam reciclados, reutilizados e biodegradáveis, e que reduzam a necessidade de manutenção”.

Ou seja, legalmente pode-se adquirir ou locar materiais reciclados, contribuindo significativamente com o meio ambiente e ainda sendo mais rápida a entrega.

Porém, numa breve busca em editais de licitação, foram encontradas diversas especificações técnicas bem vagas, conforme Apêndice A.

2.2. Eficiência Energética no Exército Brasileiro

Segundo a EPE (2021) as edificações (residências, comerciais e públicas) consomem 52% da eletricidade do país. As edificações públicas representam 16% de consumo elétrico deste grupo de edificações, ou seja, 8,3% do total de consumo de eletricidade do país. Um dos pontos destacados no relatório foi o aumento do uso de equipamentos, nestes sendo incluídos os equipamentos de ar-condicionado, principalmente para conforto térmico, e o aumento do acesso a equipamentos elétrico-eletrônicos por classes sociais mais baixas.

Rodrigues (2015) mostrou que o Exército Brasileiro também passa pelos problemas da sociedade com relação à preocupação com o consumo energético e com conforto térmico. O autor cita a preocupação com a replicação de projetos de edificações em todo o território nacional. Com isso, foi destacada em seu trabalho a importância em se ter um Guia Técnico de eficiência energética para projetos de arquitetura no Exército Brasileiro. Em suas conclusões, o autor ressaltou a importância da análise dos ventos, dispositivos de sombreamento externos, aproveitamento do aquecimento solar passivo e uso da iluminação natural, de acordo com a época do ano e o local de implantação da benfeitoria, além da importância das propriedades dos materiais de acordo com as condicionantes de contorno (locais mais frios ou mais quentes), principalmente em relação à inércia térmica.

Teixeira (2018) destacou que a eficiência energética é um dos aspectos mais importantes dentro da avaliação de construções sustentáveis e deve ser levado em conta durante a modelagem em BIM. O autor apresentou diversos trabalhos relacionando BIM à eficiência energética e desenvolveu uma ferramenta para etiquetagem expedita de eficiência energética utilizando o Revit, da Autodesk, para projetos militares.

Com relação às edificações militares, Rachid (2018) ressaltou a importância da eficiência energética, da sustentabilidade e o fato de uma instalação militar não poder ser totalmente dependente das concessionárias de energia elétrica.

Junior (2019) destacou que ainda há organizações militares fixas em que a única fonte de energia elétrica é por geradores movidos a combustíveis fósseis. O autor apresentou os problemas ambientais desta fonte, o custo de manutenção dos geradores e mostrou uma proposta para implantação de um sistema solar fotovoltaico com baterias para substituí-los. Tal medida, além da melhoria dos problemas ambientais e financeiros, poderá aumentar a operacionalidade da organização militar e contribuir socialmente com a comunidade local. Como proposta de trabalho futuro, o autor sugere uma análise com sistema híbrido para reduzir os custos com baterias, o que poderia ser feito para horários em que a geração solar pelo sistema solar fotovoltaico não supre a demanda das instalações.

Neto (2021) também ressaltou a importância da energia em relação ao desempenho das funções militares atualmente. Destacou a dependência da energia para as telecomunicações, reiterando que ainda há Pelotões de Fronteira alimentados por geradores a diesel. Aliado ao viés da sustentabilidade, o autor reiterou a preocupação, também existente no Exército Americano, que deveria ser o ideal para um projetista seguir, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Hierarquia com metas para se atingir o objetivo de economia de energia do Exército Americano



Fonte: Neto (2021)

Neste esquema o projetista deve, em primeiro lugar, se conscientizar pela redução do consumo de energia. Em segundo lugar, focar no uso eficiente, reuso, cogeração e por fim no uso de fontes renováveis, não esquecendo a segurança energética.

Pimentel (2020) destacou o Exército Brasileiro como uma das instituições com maior número de edificações no país e que se preocupa também com consumo mais eficiente de

energia, e que com isso gerará economia para a sociedade, que mantém a operação das edificações públicas por meio de pagamento de tributos. Outro destaque do autor foi para a participação do Exército Brasileiro na contribuição de pesquisas na área de eficiência energética, sendo um dos primeiros a fazer análise da recém-publicada INI-C em um projeto de edificação em construção, apontando como conclusão do seu trabalho a importância em se analisar o potencial de geração solar fotovoltaica no projeto da direção da edificação e do telhado em relação ao eixo norte.

2.3. Conforto e Desempenho Térmicos

Em alguns levantamentos na literatura, ficou constatado que, para os usuários de uma habitação, o conforto térmico é o propósito mais importante entre os pilares do conforto ambiental (além de lumínico, acústico, psicológico, umidade, qualidade do ar e ergonômico) (YANG et al., 2014 e SANTOS, 2019).

Segundo a ISO 7730 (2005), avalia-se um ambiente termicamente moderado pelo Voto Médio Estimado (PMV - *Predicted Mean Vote*), conforme Equação 1, que, dentre outros fatores, leva em conta características dos usuários e do meio ambiente.

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot \{ (M - W) \\
 & - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] \\
 & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) \\
 & - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - t_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \}
 \end{aligned}
 \tag{Equação 1}$$

Onde:

$1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$ e $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$

$M = 46 \text{ W/m}^2$ a 232 W/m^2 ($0,8 \text{ met}$ a 4 met)

$I_{cl} = 0 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ a $0,310 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ (0 a 2 clo)

$t_a = 10$ a 30°C

$t_r = 10$ a 40°C

$var = 0 \text{ m/s}$ a 1 m/s

$p_a = 0 \text{ Pa}$ a 2700 Pa

$PMV =$ Voto médio estimado, ou sensação de conforto,

$M =$ Taxa metabólica, em W/m^2 ,

$W =$ Trabalho mecânico, em W/m^2 , sendo nulo para a maioria das atividades,

$p_a =$ Pressão parcial do vapor de água, em Pa ,

$t_a =$ Temperatura do ar, em $^\circ\text{C}$,

$f_{cl} =$ Razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nú,

$t_{cl} =$ Temperatura superficial das roupas, em $^\circ\text{C}$.

$t_r =$ Temperatura radiante média, em $^\circ\text{C}$,

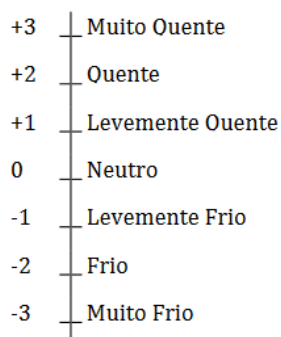
$h_c =$ Coeficiente de transferência de calor por convecção, em $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$,

$I_{cl} =$ Resistência térmica das roupas, em $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$,

$var =$ Velocidade relativa do ar, em m/s ,

E a partir do valor encontrado, utiliza-se a escala sétima para determinar a sensação térmica das pessoas, conforme Figura 5.

Figura 5 – Escala sétima utilizada para determinar a sensação térmico conforme PMV

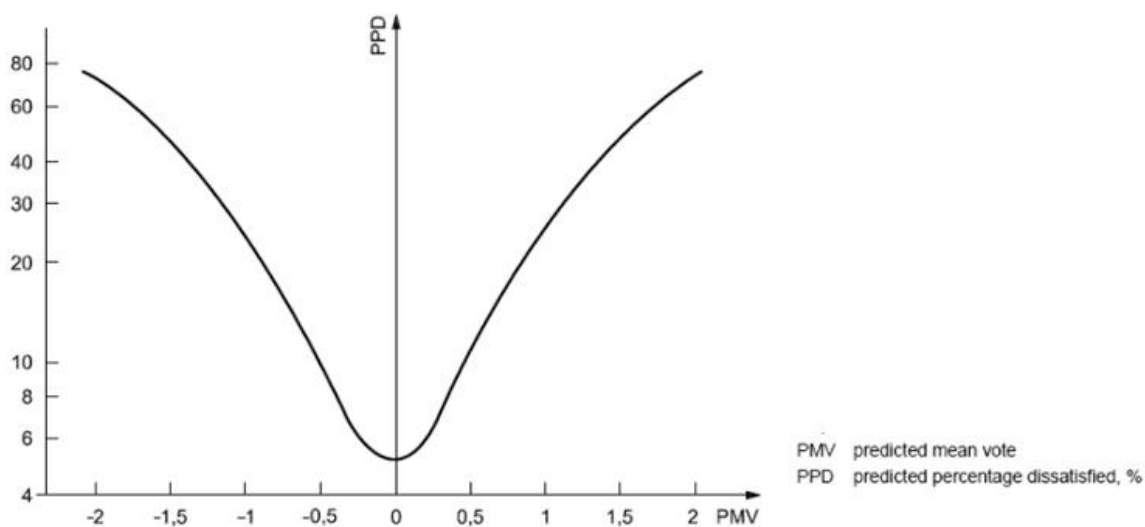


Fonte – ISO 7730 (2005)

Outro indicador apontado na ISO 7730 (2005) é o Percentual de Pessoas insatisfeitas (PPD - *Predicted Percentage of Dissatisfied*) em função do PMV, conforme Equação 2 e Figura 6.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad \text{Equação 2}$$

Figura 6 – Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) em função do voto médio estimado (PMV)



Fonte – ISO 7730 (2005)

Como exemplo, pela Figura 6, para se conseguir uma aceitabilidade de 90% dos ocupantes (10% de insatisfeitos) o ambiente deveria ter PMV entre $\pm 0,5$ e para 80% de aceitabilidade o ambiente deveria ter PMV entre ± 1 ; o PMV = ± 2 teria cerca de 80% de insatisfeitos (ou 20 % de aceitabilidade).

YANG et al. (2014), em revisão bibliográfica sobre conforto térmico e implicações no consumo energético de edificações, relataram que o modelo PMV é adequado para avaliar

o conforto térmico em edifícios climatizados mecanicamente, mas não nos casos com ventilação natural. Concluíram também que quando há adaptação no ambiente, tende-se a ampliar a faixa de temperatura de conforto térmico em edificações com ar-condicionado e ventilação natural, gerando com isso economia de energia. Outro ponto destacado pelos autores é que a ideia de “prédio-verde” faz as pessoas serem mais toleráveis com a temperatura, além da flexibilização ao uso da vestimenta e do controle pelos ocupantes das condicionantes do ambiente.

O conforto térmico é dado pela análise de seis parâmetros básicos, a saber: energia metabólica da atividade realizada, a vestimenta, a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a umidade relativa e a movimentação do ar. Os dois primeiros dependem mais do ser humano. Os outros quatro dependem das condições do ambiente. As exigências humanas quanto ao conforto térmico são caracterizadas por intervalos de valores, de acordo com as variáveis ambientais, de tal forma que se pode, em função de determinadas considerações das demais variáveis, encontrar uma zona de conforto a ser alcançada pela combinação dos sistemas passivos e ativos da edificação (ASHRAE, 2017).

Na revisão de Arenhardt e Wander (2018), o professor Richard de Dear¹¹ é o autor que apresenta maior número de citações dos seus trabalhos. Nesta revisão foram apresentados alguns trabalhos que apresentaram discrepâncias entre a teoria e a prática de pesquisas de sensação térmica em ambientes escolares. Para os revisores, deve-se tomar cuidado com o uso do PMV/PPD na faixa de temperatura de conforto da ASHRAE 55 para ambientes sem ar-condicionado em Singapura e na Itália.

Rupp e Ghisi (2019) apresentaram um trabalho sobre a avaliação de modelos preditivos de conforto térmico para escritórios em clima subtropical brasileiro. Conforme relatado, a ASHRAE 55 restringiu as condições aceitáveis a uma faixa de variação do PMV (modelo analítico de Fanger, 1970) entre -0,5 e +0,5. Segundo eles, essa restrição impacta diretamente no consumo de energia em sistemas de ar-condicionado, mas não necessariamente melhora o conforto térmico (HOYT et al. 2009; ARENS et al. 2010 apud RUPP; GHISI, 2019).

Com relação ao segundo modelo, o conforto térmico adaptativo, a temperatura de conforto interna depende da temperatura externa, mas é um modelo aplicável a ambientes

¹¹ De Dear é professor e diretor do Laboratório de Qualidade Ambiental Interior da *University of Sidney* e pesquisa o modelo adaptativo de conforto térmico.

ventilados naturalmente ou de condicionamento híbrido. Pela ASHRAE, o modelo analítico pode ser utilizado tanto em ambientes com sistema de ar-condicionado quanto em sistemas de janela aberta, mas o modelo adaptativo só poderia ser utilizado em ambientes que tenham ventilação natural. Porém, alguns autores apresentaram que os parâmetros contrariam as recomendações da ASHRAE (LUO et al. 2015, LAMBERTS et al, 2013, HWANG et al., 2009 e HENS, 2009 apud RUPP e GHISI, 2019) com relação ao uso desta norma. Foi proposto a utilização de PMV entre -1 e +1. Em edificações com ventilação natural, foi proposto o uso do conforto térmico adaptativo (RUPP e GHISI, 2019).

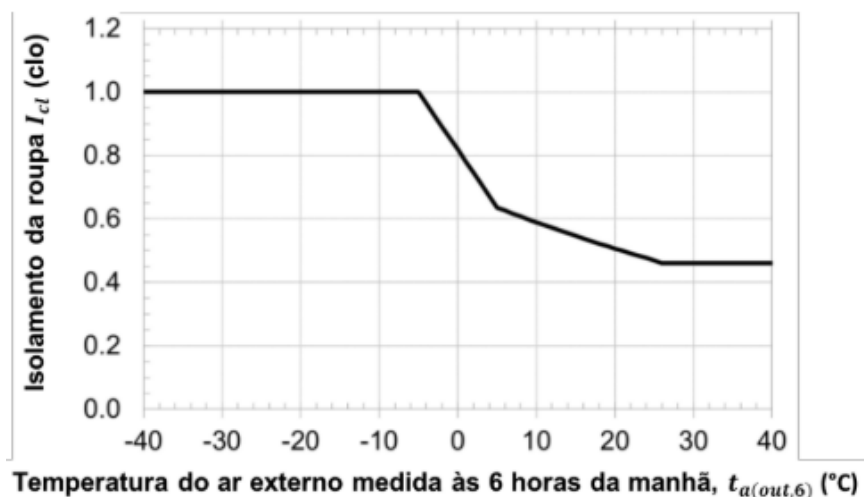
De Dear et al. (2020) apresentaram como um dos principais fatores preocupantes para o conforto térmico adaptativo o aquecimento global e o consequente aumento do uso de ar-condicionado para resfriar os ambientes. Com tais fatores, não é surpreendente que os autores encontraram, em 21 anos de revisão bibliográfica, mais de 1200 artigos sobre o tema de redução de energia mantendo o conforto térmico adaptativo. Os autores apontaram os vários problemas encontrados em artigos que tentaram adaptar o modelo PMV para situações locais (em alguns países). Outro ponto destacado pelos autores é o fato de o comportamento variar com a tipologia da edificação, nas zonas climáticas e a sazonalidade, entre quem vive em zona rural e na zona urbana, e entre os mais idosos e dos mais jovens.

Nas versões históricas da ASHRAE 55, a temperatura de conforto evoluiu com o tempo (entre as décadas de 1940 e 1980), ficando mais estreita (a zona de conforto de verão caiu 1°C e a de inverno aumento cerca de 3°C). Essa constatação fez alguns pesquisadores concluírem que: a energia pode estar sendo mal utilizada para manter as condições internas constantes, apesar das variações externas, e as pessoas podem estar perdendo a capacidade de se adaptar às variações climáticas. A partir de 2004 a ASHRAE 55 incluiu o conforto adaptativo. Pela conclusão do artigo, os autores apontaram que tal questão serve para estimular as atitudes e comportamento dos ocupantes com relação ao clima interno (DE DEAR et al., 2020).

Gamarra (2020), que analisou o projeto de casa rural em contêineres para diferentes climas no Brasil, utilizou os modelos de Fanger e adaptativo para avaliação do conforto térmico considerando a edificação climatizada. Para o cálculo das horas de desconforto térmico, utilizou os dados: velocidade do ar de 1,0 m/s, taxa de calor por pessoa de 115 W e vestimenta *Dynamic clothing model*, conforme Figura 7. Para a autora, a simplificação de se utilizar 0,5 clo ou 1,0 clo é incorreta pois as pessoas alteraram frequentemente suas roupas de acordo com as condições térmicas ao seu redor. Por isso, a autora utilizou, com relação

ao termostato, a configuração ZoneControl:Thermostat:OperativeTemperatura do programa EnergyPlus¹², calculada com base na ASHRAE Standard 55.

Figura 7 – Representação gráfica do modelo de *isolamento* de vestimentas *Dynamic clothing model*



Fonte: Gamarra (2020)

Pelo gráfico da Figura 7, para as temperaturas entre 20 °C e 30 °C o *clo* varia entre 0,4 e 0,5. O termo “desempenho térmico” da envoltória tem grande relação com a eficiência energética em edificações, uma vez que a taxa de ganho ou perda de calor está ligada às propriedades de transmitância e capacidade térmica da envoltória das edificações. Por sua vez, as propriedades térmicas da envoltória influenciam na carga térmica a ser retirada ou adicionada pelos sistemas de resfriamento ou aquecimento artificiais (SANTOS, 2019).

Lamberts et al. (2014) apresentaram também a influência da orientação da edificação em situações diversas, como o beiral, que além de servir de proteção solar horizontal, ajuda a direcionar o fluxo de ar para o interior da edificação. Os autores recomendaram também a utilização da ventilação noturna para auxiliar no resfriamento da edificação.

Chen et al. (2016) relataram que para atingir uma meta sustentável em projetos de construção de edifícios, os projetistas podem considerar a exploração de recursos de projeto passivo, como o das propriedades termofísicas do envelope, geometria do edifício e

¹² O software EnergyPlus (2014) é um programa de simulação de energia de edifícios utilizado para analisar o consumo de energia para aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação, além de geração de energia local. Além disso, o programa dimensiona a demanda de HVAC por zona térmica, analisa o desempenho térmico e lumínico, usa dados climáticos locais, permite a análise de dados horários durante todo o ano, permite configurações de uso de acordo com as necessidades do projetista, importa e exporta maquetes 3D, exporta relatórios pré-definidos e é gratuito e de código aberto.

infiltração e vedação, que comprovadamente afetam o desempenho do edifício em muitos estudos.

Linczuk (2020) apresentou, em seu estudo para edificações com baixo consumo energético na Região Sul do Brasil, problemas de superisolamento¹³ de fachadas (isolamento muito maior que o recomendado) em climas frios e climas quentes. Em climas frios foi apresentado o problema de controle de umidade. Em climas quentes ele apresentou problema quando esfria a noite e o ambiente tem dificuldade de perder calor. Como solução, para clima frio, ele apresentou o uso de trocador de calor e para o clima quente foi sugerido o uso de beirais mais largos. Segundo o trabalho analisado, outros autores reportaram reclamações pós-ocupação em casas superisoladas (JONES, 2016; BOTTI, 2017; MCGILL; SHARPE, 2017 apud Linczuk, 2020).

De Deus e Silva (2021), ao simularem uma grande variedade de configurações para contêineres para cidade de Campo Grande, considerando condicionamento híbrido, encontraram alta quantidade de horas de desconforto segundo a ASHRAE 55, e apresentaram como sugestão de trabalhos futuros a inclusão de sombreamento nas áreas transparentes, além de incluir mais uma janela para melhorar ventilação cruzada.

Sartori et al. (2021) utilizaram o modelo adaptativo da ASHRAE 55 (2017) para avaliar ambientes naturalmente ventilados considerando uma faixa de temperatura de conforto para 80% dos usuários satisfeitos. As temperaturas dos ambientes encontradas nas simulações eram comparadas com a faixa de temperaturas operativas de conforto calculadas para se obter o Percentual de Horas Ocupadas em Conforto (PHOC) e utilizaram a ferramenta *AirflowNetwork* do EnergyPlus para simular a ventilação natural. Os autores concluíram que os resultados alcançados por simulação podem ser utilizados para recomendar níveis adequados de conforto térmico, mas que recomendam trabalhos para realizar medições térmicas *in loco*, além de ressaltarem a necessidade e importância do desenvolvimento de norma específica para conforto térmico em tipologia escolar.

Rupp et al. (2017) constataram que o modelo PMV/PPD apresenta certa inadequação para o clima subtropical úmido (Florianópolis), principalmente quando se considera o intervalo restrito de $\pm 0,5$.

¹³ “...a estratégia básica da superisolação é tornar a casa tão bem isolada e tão hermética - tão conservadora de calor - que é mantida aquecida quase inteiramente pela energia que é recebida passivamente” (SHURCLIFF, 1986 apud LINCZUK, 2020)

Com esta parte da revisão bibliográfica, constata-se que o conforto e o desempenho térmicos têm abordagens diferentes conforme as condições do ambiente, seja ele ventilado naturalmente ou climatizado mecanicamente. Merece destaque também o apontamento que a “zona de temperatura de conforto térmico” tem evoluído como tempo e varia por diversos fatores, tais como vestimenta, nível de atividade e condições ambientais. Com isso, serão analisados, a seguir, alguns regulamentos e normas brasileiras sobre este tópico para verificar os principais pontos a serem abordados neste trabalho.

2.4. Regulamentos de conforto e desempenhos térmico e energético no Brasil

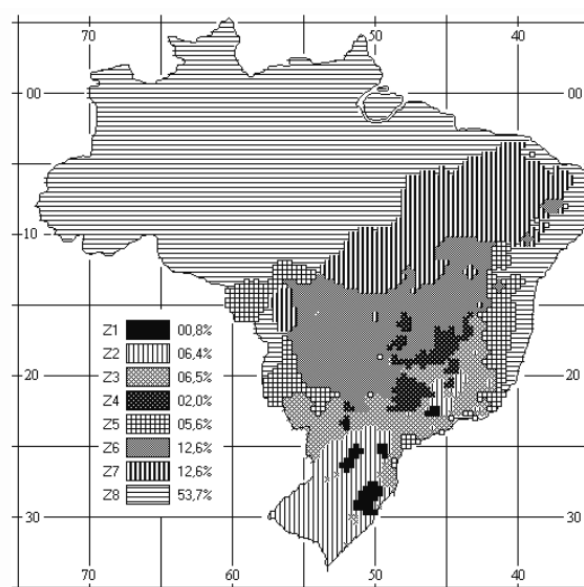
2.4.1. ABNT NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações

A ABNT NBR 15220 trata do desempenho térmico de edificações e está dividida em cinco partes, sendo a parte 1: Definições, símbolos e unidades (2005a), tais como Resistência térmica (R), propriedades radiantes dos elementos diferem em relação ao fluxo de calor, Capacidade térmica (C), Atraso térmico (φ), Fator solar (FS), Taxa metabólica (TM ou met), Índice de resistência térmica de vestimentas (I_t ou clo), Zona bioclimática (ZB). A parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações (2005b corrigida 2008). A Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (2005c). A Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida e a Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

A

Figura 8 apresenta a divisão do Brasil em oito ZB, conforme a NBR 15220-1 (ABNT, 2005a). Estas zonas são regiões climáticas que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano.

Figura 8 – Zonas bioclimáticas segundo a NBR 15220-3:2005, com porcentagens abrangidas do território



Fonte: ABNT NBR 15.220-3 (2005c)

A parte 3 desta norma (NBR 15220-3, 2005c) apresenta algumas diretrizes de construção para cada zona bioclimática, conforme exemplos apresentados na Tabela 4. Estas zonas bioclimáticas foram selecionadas porque contemplam as cidades escolhidas para a avaliação neste trabalho, conforme mostrará o Item 3. A cidade de Campo Grande - MS foi escolhida por ser a sede desta pesquisa e a cidade de Boa Vista – RR foi escolhida, por ser, atualmente, a cidade que o Exército mais está utilizando contêineres como edificação. Campo Grande está na ZB-6, que é caracterizada por clima quente e subúmido, com chuvas no verão e inverno seco. Boa Vista está na ZB-8, que é caracterizada por clima equatorial quente e úmido durante todo o ano.

Tabela 4 – recomendações para envoltória de acordo com cada ZB

ZB	Aberturas para ventilação	Vedações externas	Estratégias
ZB-6	Tamanho médio ¹ com sombreamento	Paredes pesadas ⁴ e cobertura leve isolada	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento, ventilação seletiva. Vedação interna pesada no inverno

ZB-8	Tamanho grande ² com sombreamento	Paredes leves refletoras e cobertura leve refletora	Ventilação cruzada permanente e condicionamento ativo nas horas mais quentes
------	--	---	--

Observações: ¹ tamanho médio: entre 15% a 25% da área de piso; ² tamanho grande: área maior que 40% do piso; ³ paredes leves: Transmitância Térmica ≤ 3 W/m².K, Atraso Térmico $\geq 4,3$ h e Fator Solar $\leq 5,0$ %; ⁴ paredes pesadas: Transmitância Térmica $\leq 2,2$ W/m².K, Atraso Térmico $\geq 6,5$ h e Fator Solar $\leq 6,5$ %; ⁵ parede leve refletora: Transmitância Térmica $\leq 3,6$ W/m².K, Atraso Térmico $\geq 4,3$ h e Fator Solar $\leq 4,0$ %; ⁶ cobertura leve isolada: Transmitância Térmica $\leq 2,0$ W/m².K, Atraso Térmico $\leq 3,3$ h e Fator Solar $\leq 6,5$ %; ⁷ cobertura leve refletora: Transmitância Térmica $\leq 2,3$ FT, Atraso Térmico $\leq 3,3$ h e Fator Solar $\leq 6,5$ %.

Fonte (ABNT 2005-3)

Marques et al. (2011) mencionam que é importante considerar que a aplicação da NBR 15220-3 (ABNT, 2005c) deve ser feita criteriosamente, pois ela indica apenas porcentagens de área de abertura em relação à área do piso de cada ambiente, não fornecendo indicações precisas em relação ao entorno do edifício, às posições dessas aberturas e às direções dos ventos predominantes.

2.4.2. ABNT NBR 15.575 - Edificações habitacionais — Desempenho

Esta norma trata de Edificações habitacionais, mais especificamente de Desempenho. Recentemente (em 30/03/2021) foi emendada e é dividida em seis partes: Parte 1: Requisitos gerais; Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais; Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos; Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas; Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas e Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Com relação ao desempenho térmico, possibilita a análise da carga térmica quando condicionada artificialmente. Embora não se aplique a edificações provisórias, ela foi considerada neste trabalho com intuito de se absorver informações úteis e aplicáveis a contêineres e a avaliação de desempenho por simulação computacional.

Sobre o uso com ventilação natural, a análise deverá considerar a abertura de janelas apenas quando a temperatura de bulbo seco interna for igual ou superior a 19 °C ou superior à temperatura de bulbo seco externa.

Outro destaque, da Parte 1 versão 2013 (ABNT, 2013), são as propostas para climas quentes:

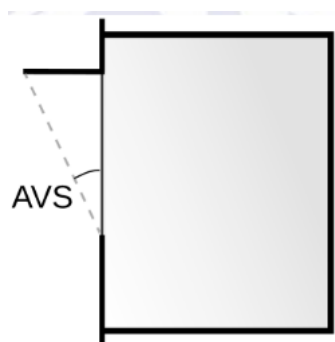
- sombreamento: inserção de proteção solar externa ou interna da esquadria externa com dispositivo capaz de cortar no mínimo 50 % da radiação solar direta que entraria pela janela, com taxa de uma renovação do volume de ar do ambiente por hora de 1,0 ren/h;

- ventilação e sombreamento: combinação das duas estratégias, por exemplo, inserção de dispositivo de proteção solar e taxa de renovação do ar de 5,0 ren/h.

Para o percentual de abertura para ventilação de referência considera-se maior ou igual a 7,0 % da área de piso para ZB de 1 a 7 e 12 % para ZB 8 – Região Norte do Brasil.

Com relação aos elementos transparentes, para área de piso menor que 20,0 m² deverão ter menos de 20 % de proporção entre a área transparente e a de piso. Caso a área de piso seja maior que 20,0 m², a área transparente deverá ser menor ou igual a 4,0 m². Pode-se aumentar os valores de Percentual de elementos transparentes quando se diminui o Fator Solar (razão entre o ganho de calor que entra em um ambiente e a radiação solar incidente nesta mesma área) ou quando se aumenta o ângulo vertical de sombreamento (AVS), demonstrado na Figura 9:

Figura 9 – Representação em corte de um ambiente com a representação do ângulo vertical de sombreamento



Fonte: ABNT NBR 15.575-4 (2021)

Nos casos de superfície externa em chapas metálicas de qualquer natureza, a superfície externa deve apresentar valor de emitância térmica superior a 0,7 para as ZBs 3 a 8, por meio de laudo técnico padronizado na tabela 1 da ABNT NBR 15.575-1 (2021).

2.4.3. Instrução Normativa para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)

Em 24 de fevereiro de 2021, o INMETRO publicou a Portaria nº 42 que aprova a nova Instrução Normativa para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C), que aperfeiçoa os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), especificando os critérios e os métodos para classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua Eficiência Energética (BRASIL, 2021).

Mesmo não sendo objetivo deste trabalho a etiquetagem de contêiner, serão utilizados alguns preceitos apresentados para melhorar a envoltória relativamente à eficiência energética. Para eficiência mínima A para condicionadores de ar tipo Split 4,1 SCOP (coeficiente sazonal de performance W/W), requisito de isolamento térmico de tubulações para a condução de fluídos, conforme Equação 3:

$$E = \left(1 + \frac{e}{r}\right)^{\lambda/\lambda'} - 1 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

E é a espessura mínima do isolamento térmico (cm);

r é o raio externo da tubulação (cm);

e é a espessura de isolamento térmico, de acordo com a temperatura de fluido e tamanho da tubulação (cm);

λ é a condutividade térmica do material relativo à temperatura média indicada para a temperatura do fluido (W/(m.K));

λ' é o valor superior do intervalo de condutividade para a temperatura do fluido (W/(m.K)).

Outro ponto que merece destaque é o Fator de Forma (FF, dado pela Equação 4) e as tipologias das edificações. A instrução relata que a redução do consumo de energia primária varia de acordo com o FF e o Grupo Climático a qual a cidade pertence. À medida que o FF aumenta, aumenta-se o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para a classificação A.

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{tot}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

FF é o fator de forma da edificação (m^2/m^3);

A_{env} é a área da envoltória (m^2);

V_{tot} é o volume total construído da edificação (m^3).

A Tabela 5 mostra alguns valores de referência da INI-C para a tipologia de Escritório, referente às características da envoltória.

Tabela 5 – Valores referência para uso da tipologia Escritório

Uso típico	Escritório
Aberturas	
PAF - Percentual de área de abertura da fachada (%)	50
Parede	
Upar - Transmitância da parede externa (W/m ² K)	2,39
α PAR - Absortância da parede (adimensional)	0,5
CTpar - Capacidade térmica da parede externa (kJ/m ² K)	150
Cobertura	
Upar - Transmitância da parede externa (W/m ² K)	2,06
α PAR - Absortância da parede (adimensional)	0,8
CTpar - Capacidade térmica da parede externa (kJ/m ² K)	233

Vidro	
FS – Fator solar do vidro (adimensional)	0,82
Uvid - Transmitância do vidro (W/m ² K)	5,7
AHS - Ângulo horizontal de sombreamento (°)	0
AVS - Ângulo vertical de sombreamento (°)	0
Carga térmica	
DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	14,1
Ocupação (m ² /pessoa)	10,0
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m ²)	15,0
Horas de ocupação (horas)	10
Dias de ocupação (N _{ano})*	260
Isolamento do piso	Sem isolamento
COP - Coeficiente de performance (W/W)	2,6
Temperatura setpoint (°C)**	24,0

* será utilizado valor diferente pois o uso militar será analisado 365 dias por ano.

Com relação ao método de simulação, o programa EnergyPlus atende às exigências conforme já fora apresentado por vários autores. O arquivo climático deve, preferencialmente, ser obtido por meio do endereço eletrônico <http://pbeedifica.com.br/arquivos-climaticos>.

Pela INI-C, a envoltória da edificação é analisada pelo consumo total anual de climatização. No caso de edifícios ou ambientes condicionados naturalmente, deve-se atender a 90% de horas ocupadas com conforto térmico (PHOCT), considerando o modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55.

Com relação à energia gerada no local, este regulamento diz que uma edificação de energia quase zero (NZEB) deve ter pelo menos 50% de sua demanda energética anual suprida por energia renovável gerada localmente. A edificação de energia positiva tem a geração de energia maior que a energia demandada.

2.4.4. ABNT NBR 16.401 – Instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitários

A ABNT 16.401 – Instalações de ar-condicionado – sistemas centrais e unitários está dividida em três partes. A Parte 1: Projeto das instalações (2008a); a Parte 2: Parâmetros de conforto térmico e a Parte 3: Qualidade do ar interior (2008b).

Apesar de não se aplicar a pequenos sistemas unitários isolados, para conforto térmico, em que a soma das capacidades nominais das unidades seja inferior a 10 kW (pouco mais de 34.000 BTU - *British thermal unit*), alguns conceitos poderão ser utilizados.

Em sua parte 2, os autores esclarecem que não há como proporcionar conforto para 100% dos ocupantes de um ambiente ao mesmo tempo, mas definem que é sustentável

expressar satisfação quanto ao conforto térmico para uma maioria de 80% ou mais, para as pessoas de um grupo homogêneo em termos de atividade física (medido em “met”, que equivale a 58,2 W/m²) e tipo de roupa usada (medido em “clo”, que equivale a 0,155 m² K/W) e área superficial de uma pessoa média de 1,8 m².

A norma apresenta os fatores que afetam o conforto térmico, sendo: temperatura operativa, velocidade do ar e umidade relativa do ar. A temperatura operativa é a temperatura uniforme de um ambiente imaginário, no qual uma pessoa trocaria a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente não uniforme real.

Com relação à avaliação das condições de conforto térmico, a norma segue a escala ASHRAE, conforme Figura 5 e Figura 6.

A parte 3 da norma especifica parâmetros básicos e requisitos mínimos para o sistema de ar-condicionado, visando a obtenção de qualidade aceitável de ar interior para o conforto térmico. De acordo com a norma, as vazões de ar de ventilação estipuladas não devem depender da capacidade ou do tipo de instalação de ar-condicionado.

Revisão da ABNT NBR 16.401-2 – JAN 2021

Atualmente a Norma brasileira está em revisão¹⁴. Para os autores, a avaliação de conforto térmico deve ser feita segundo a norma ASHRAE 55 - *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Como relataram, no Brasil não existe norma específica para avaliação de conforto térmico, havendo apenas a NR-17, que trata de parâmetros de conforto térmico para espaços internos (NR-17 – Ergonomia) e a parte 2 desta norma em revisão. Contudo, essas duas se limitam aos ambientes comerciais que operam com intervalos restritos de temperatura e velocidade do ar.

No projeto de revisão da ABNT NBR 16401-2¹⁵, de janeiro de 2021, passam a ser variáveis térmicas ambientais: a temperatura média do ar e a temperatura radiante média, ao invés de temperatura operativa. Além disso, pretendem especificar as condições térmicas aceitáveis para adultos saudáveis expostos à pressão atmosférica equivalente a altitudes de até 3000,0m e em ambientes internos projetados para ocupação humana considerando períodos superiores a 15min.

¹⁴ Sobre a ABNT NBR 16.401 (2008), parte 2: <https://labeee.ufsc.br/node/808> , acessado em 20/08/2021

¹⁵ Disponível em <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/210126%20PROJETO%2016401-2.pdf> acessado dia 20/08/2021.

Está se propondo a inclusão de alguns termos, tais como: edificações híbridas (que combinam a ventilação natural proveniente da abertura de janelas ao condicionamento mecânico), modelo adaptativo (modelo que relaciona as temperaturas internas aceitáveis com as temperaturas externas), mudança de *setpoint* de temperatura (mudança progressiva no controle de temperatura). Outro aspecto importante é que deverá ser definido o ocupante representativo considerado no projeto (em quantidade, *clo* e *met*).

Com relação à determinação das condições térmicas aceitáveis, propõem-se dois métodos: o da zona analítica de conforto térmico (velocidade média do ar menor ou igual a 0,2 m/s) e da zona gráfica (para altas velocidades do ar acima de 0,02 m/s). Ambos consideram as taxas metabólicas médias entre 1,0 e 2,0 met e isolamento de vestimenta entre 0 e 1,5 clo. Para exemplificar, seguem alguns valores de taxa metabólica maior que 2 met: limpar uma casa (2 a 3,4 met), manipulação de sacos de 50 kg (4,0 met), caminhando a mais de 1,0 m/s, dançar (2,4 a 4,4 met), dentre outras. Quanto ao clo, alguns exemplos de valores: calça + camisa manga curta (0,57 clo); calça + camisa manga longa (0,61 clo); calça + camisa manga longa + paletó (0,96 clo), sendo que todos incluem sapatos, meias, cuecas. No método analítico, o PMV tem que estar entre $-/+ 0,5$.

Para os ambientes ventilados naturalmente e controlados pelos usuários por meio de janelas (método adaptativo), as taxas metabólicas dos ocupantes devem estar entre 1,0 e 1,5 met; as suas vestimentas entre 0,3 e 1,0 clo e a temperatura média do ar externo entre 10,0 °C e 33,5 °C.

2.4.5. Outros regulamentos

Em Brasil (2018a), estabelece que todos os edifícios de uso público e coletivo deverão possuir Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC) com base na Resolução nº 9 de 2003 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Esta resolução (BRASIL, 2003) estabelece, para ambientes de uso público e coletivo, devem seguir a ABNT NBR 6401:1980 (substituída pela ABNT NBR 16.401-2:2008, que está em revisão) e:

“3.1 - A faixa recomendável de operação das Temperaturas de Bulbo Seco, nas condições internas para verão, deverá variar de 23 °C a 26 °C... com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 28 °C. A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 20 °C a 22 °C.

3.2 - a faixa recomendável de operação da Umidade Relativa, nas condições internas para verão, deverá variar de 40 % a 65 %..., com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 70 %. A seleção da faixa depende da finalidade e

do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 35 % a 65 %.

3.3 - o Valor Máximo Recomendável - VMR de operação da Velocidade do Ar, no nível de 1,5 m do piso, na região de influência da distribuição do ar é de menos 0,25 m/s.

3.4 - a Taxa de Renovação do Ar adequada de ambientes climatizados será, no mínimo, de 27 m³/hora/pessoa, exceto ... não sendo admitido em qualquer situação que os ambientes possuam uma concentração de CO₂, maior ou igual a estabelecida..."

A Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) estabelece que os locais de trabalho deverão ter ventilação natural, compatível com o serviço realizado (art. 176), e/ou ventilação artificial quando a natural não atender às condições de conforto térmico (parágrafo único do art. 176), e/ou a obrigatoriedade de uso de vestimenta adequada para o trabalho (art. 177) (BRASIL, 1943).

A NR 17 (BRASIL, 2018b), estabelece parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente. Com relação às condições ambientais de trabalho ela recomenda: níveis de ruído, índice de temperatura efetiva entre 20 °C e 23 °C, velocidade do ar não superior a 0,75 m/s e umidade relativa do ar não inferior a 40 %, iluminação geral uniformemente distribuída e difusa.

2.5. Análises computacionais de edificações

2.5.1. Simulação

Simulação é uma tentativa de imitação da operação de um processo ou sistema real ao longo do tempo, frequentemente com experimentos de computadores, podendo ser sistemas naturais ou humanos¹⁶.

Didoné e Pereira (2010 apud OLIVEIRA et al., 2016) afirmaram que a avaliação do desempenho é uma tarefa relativamente complexa que envolve uma grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares. Oliveira et al. (2016) relataram que a simulação computacional permite realizar essa análise ainda na fase de projeto. Medeiros et al. (2019) relataram que as simulações computacionais têm permitido analisar situações relativamente complexas em microcomputadores pessoais, e mostraram que o uso

¹⁶ Definição adaptada de < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Simula%C3%A7%C3%A3o>>. Acessado em 06 Nov 2021.

dessa tecnologia pode provocar economia no consumo energético e melhora no desempenho térmico da edificação e conseqüente aumento do conforto do usuário.

Melo (2018) apresentou que a simulação computacional é um processo para tomada de decisões que envolve parâmetros geométricos, como orientação e forma da edificação, e os seus materiais constituintes, aproximando-se mais da realidade, ainda na fase de projeto, do que a análise prescritiva.

Shi et al. (2016) apresentaram, entre 116 referências consultadas, o programa EnergyPlus sendo o software de simulação energética mais utilizado. Nguyen et al. (2014), em sua revisão sobre métodos de otimização baseados em simulação aplicados à análise de desempenho de edifícios, corroborou a importância do EnergyPlus. O EnergyPlus se mostrou mais utilizado que o TRANSYS, DOE-2 e ESP-r em ambos os trabalhos.

Quanto à ventilação natural, Veiga et al. (2019) apresentaram que o Energyplus apresenta contradição física entre a troca de ar por ventilação e de calor por radiação no ambiente. Os autores constataram que o Energyplus apresenta o mesmo comportamento das transmissões de radiação solar quando se está analisando uma situação com ventilação natural (janela aberta) e sem ventilação (janela fechada). Pelo resultado da análise dos autores, o EnergyPlus considera a presença de elemento translúcido quando a janela está aberta pois não é transmitido 100 % da radiação incidente para dentro do ambiente. Como solução, os autores apresentaram a ferramenta Energy Management System (EMS), que é capaz de modelar um material que permita o fluxo de calor através do elemento translúcido da janela sem resistências, simulando uma janela aberta.

2.5.2. Análise de sensibilidade

O processo de simulação geralmente envolve uma gama muito grande de variáveis. Para se analisar quais são realmente importantes, deve ser feita uma análise de sensibilidade, de modo a determinar e compreender como as variáveis se comportam entre si e entre os objetivos buscados (FERREIRA, 2013).

Para Tian (2013), o método de análise de sensibilidade é o mesmo em diferentes tipos de aplicação na análise energética de edifícios. As etapas típicas para implementar a análise de sensibilidade na análise de desempenho de edifícios são:

- determinar as variações de entrada;
- criar modelos de construção;

- executar as simulações;
- coletar resultados;
- executar a análise de sensibilidade;
- interpretar os resultados.

Os métodos de análise de sensibilidade aplicados no domínio da análise de edifícios podem ser divididos em abordagens local e global. A abordagem global é mais confiável devido às influências da incerteza das entradas em todo o seu espaço amostral. Como subtipo da abordagem global, tem-se o método de Morris, utilizado em muitos estudos de análise de edifícios (TIAN, 2013), Westphal (2007) e Silva (2016), e implementado no programa jEPlus+EA.

O Método de Morris (1991 apud Silva, 2016) inicia com a criação de uma região regular de k dimensões (parâmetros) por p níveis, com x_i variáveis dentro do intervalo normalizado $\{0, \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1\}$, para todas as variáveis. As variáveis independentes são denotadas por X_i , com i variando de 1 a k , em p níveis. Para um valor X_i , o efeito elementar de i ésima variável será dado conforme a Equação 5.

$$d_i(x) = \frac{y(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_k) - y(x)}{\Delta} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: Δ é um valor enter $\{0, \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1\}$;

p é o número de níveis das variáveis;

X_i é cada valor do espaço criado;

y é a função selecionada que usa X como variável de entrada;

$d_i(X)$ é o efeito elementar da i ésima variável na função y .

Segundo Silva (2016), p deve ser convenientemente um número par e Δ igual a $p/(2 \times (p-1))$. No método de Morris, as medidas de sensibilidade são a média dos efeitos elementares da i ésima variável (μ_i) e o seu desvio padrão (σ_i). Com r diferentes trajetórias de $k+1$ pontos, totalizando $r \times (k+1)$ observações para o modelo. A análise é feita com k movimentos para se calcular o efeito elementar $d_i(X_j)$. Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007 apud Silva, 2016) aperfeiçoaram o método de Morris, calculando a média dos valores absolutos (μ_i^*) dos efeitos elementares:

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r d_i(X_j) \quad \text{Equação 6}$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |d_i(X_j)| \quad \text{Equação 7}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^r \frac{[d_i(X_j) - \mu_i]^2}{R - 1}} \quad \text{Equação 8}$$

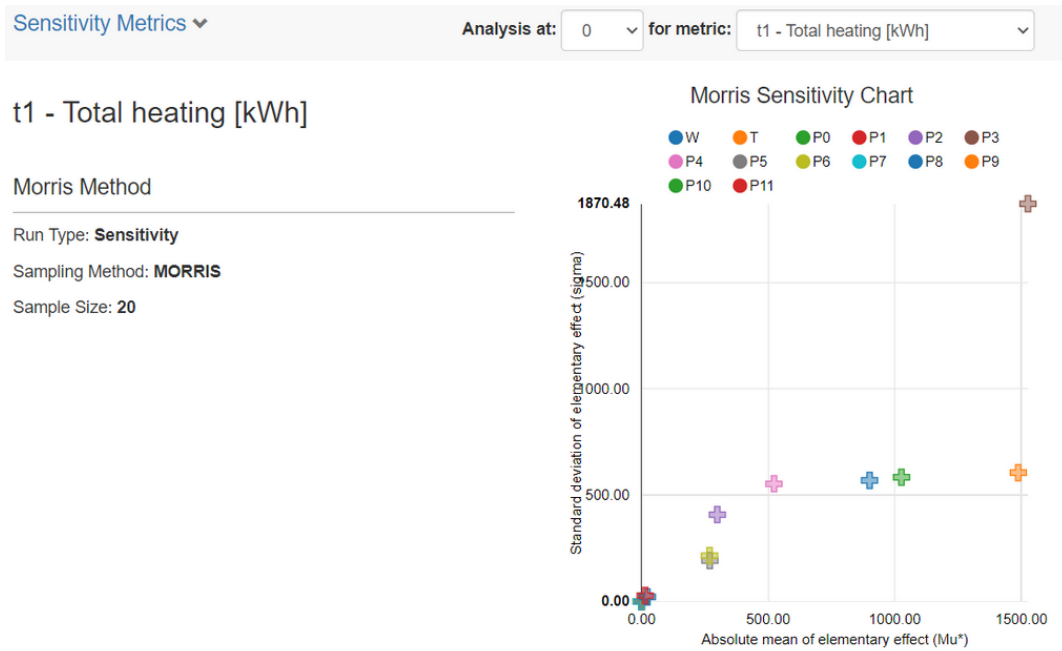
Graficamente, a média é representada no eixo x e o desvio padrão no eixo y. As médias (μ^*) altas significam influência na variável dependente, enquanto desvios padrão altos significam elevado comportamento não linear da variável.

Segundo Silva (2016), o método de Morris é útil para modelos lineares, não-lineares e não-monotônicos e geralmente demanda pequeno tamanho de amostra, que depende do número de trajetórias e do número de variáveis independentes. Segundo Morris (1991, apud SILVA, 2016), o valor numérico da média não é útil em termos quantitativos, mas apenas qualitativos. Segundo Silva (2016), isto significa que o que importa é que uma variável é mais ou menos influente do que a outra, e não o quanto é mais ou menos influente do que a outra.

Silva (2016) mostrou algumas divergências quando se analisa diferentes números de níveis de variação dos parâmetros no método de Morris para análise de sensibilidade. Em sua análise, foram considerados 4 e 8 níveis. O autor ressaltou que, para as variáveis mais influentes, o resultado foi igual, mas a diferença começou a partir da quarta variável mais independente mais influente.

Zhang e Jankovic (2017) apresentaram a ferramenta JEA Web API (*Application Programming Interface*), integrada ao jEPlus e Energyplus, interativa com vários usuários, que permite acompanhar, controlar, ajustar, adicionar ou remover parâmetros durante a progressão do processo de pesquisa. Durante o processo, os melhores resultados são arquivados por Pareto, ordenando do melhor para o pior. A plataforma permite ainda fazer análises por meio de Coordenadas Paralelas, Matrizes de dispersão, modelo de regressão linear e medidas de sensibilidade, dentre elas, Morris, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – Exemplo de Análise de Sensibilidade pelo JEA para o método de Morris.



Fonte: Zhang e Jankovic (2017)

Neste exemplo, a abscissa apresenta os valores de média absoluta de efeitos elementares e no eixo da ordenadas é representado os valores de desvio padrão de efeitos elementares. Cada gráfico permite representar as relações de todos os parâmetros para um único objetivo.

2.5.3. Otimização multiobjetiva

A parametrização é utilizada entre a modelagem e simulação por otimização no intuito de abranger uma grande gama de variáveis. Nesta etapa são definidos os parâmetros e características dos indivíduos para a otimização. Apesar do EnergyPlus permitir a parametrização das variáveis, vários autores têm utilizado o JEPlus para a parametrização e criação de amostras (em formato .idf) e gerenciar os resultados (em formato .cvs) (MELO et al., 2015; TRIANA, 2016; VERSAGE, 2016 apud JE Plus, 2017).

Em Zhang e Jankovic (2017), a otimização é o procedimento usado para encontrar as melhores características de um sistema ou projeto para torná-lo tão eficaz ou funcional quanto possível. Shi et al. (2016) dividiram as técnicas de otimização em duas grandes categorias: a otimização genérica (feita em programas de otimização que não tem finalidade específica, como exemplo o MatLab e o GenOpt) e a otimização com propósito especial (feita em programas que integram a outra plataforma específica, como por exemplo o jEPlus+EA, que analisa apenas fim energético).

Nguyen et al. (2014) propuseram um esquema de simulação juntamente com a otimização, conforme esquema apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema de acoplamento aplicado a otimização baseada em simulação



Fonte: Adaptado Nguyen et al. (2014 apud LINCZUK, 2020)

Conforme apresentado na Figura 11, o processo de otimização é iniciado com as restrições, funções-objetivos (de maximização ou minimização) e as configurações dos parâmetros do projeto e a simulação (que gera os arquivos de saída). Os arquivos de saída da simulação são analisados com os objetivos da otimização para verificar se os critérios projetuais foram atendidos ou não. Caso tenham sido atendidos, o programa de otimização apresenta os melhores resultados; caso não consiga atender, o projetista deverá incluir novos valores ou alterar os critérios e analisar novamente.

A otimização pode ser realizada com um objetivo ou mais. Alguns autores testaram dois objetivos transformados em “um objetivo”, conforme Bre et al. (2016), que utilizaram o método da soma ponderada ao invés da abordagem baseada em Pareto. A primeira é a abordagem clássica, que consiste em definir um objetivo único como a soma ponderada dos subobjetivos. Este “objetivo único” pode ser minimizado usando algoritmos de otimização típicos, mas não se pode inferir como os subobjetivos afetam uns aos outros, como permitem os métodos da fronteira de Pareto. Com relação a uma edificação, os autores minimizaram a função f , dada pela soma ponderada de D_{total} (grau-hora de desconforto térmico) e E_{total} (consumo de energia dos aparelhos de ar-condicionado), chamadas funções-objetivas no contexto da Teoria da Otimização e deram o mesmo peso para cada uma das funções.

Estes dois últimos trabalhos, além de Nguyen et al. (2014) e Linczuk e Bastos (2020), utilizaram o jEPlus+EA (ZHANG; JANKOVIC 2017). Este software, que trabalha com

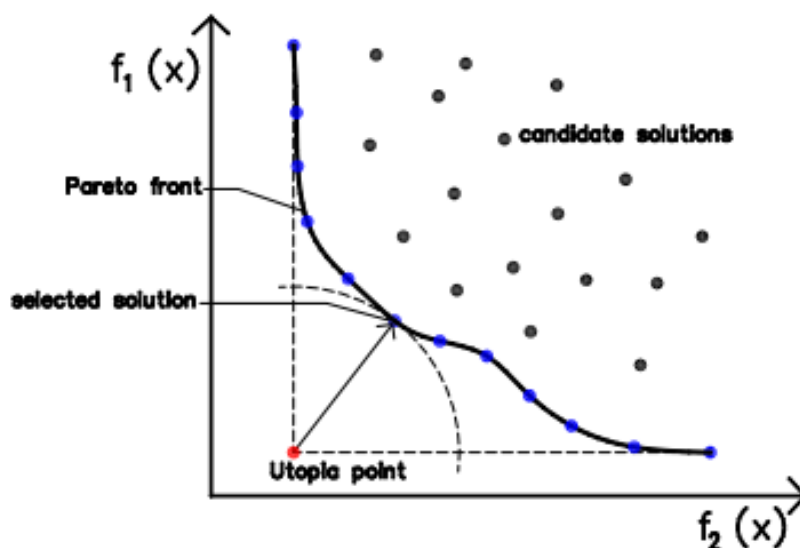
algoritmo evolutivo (*EA - evolutionary algorithm*) ajuda o projetista a encontrar as melhores soluções. São exemplos de objetivos de otimização que ele analisa:

- minimizar consumo anual de aquecimento, ou resfriamento ou iluminação ou total; consumo de energia no ciclo de vida;
- minimizar a emissão de CO₂;
- minimizar custo operacional; custo de construção;
- minimizar horas de desconforto térmico;
- maximizar a qualidade ambiental como, por exemplo, a qualidade do ar, temperatura interna.

Fonseca et al. (2017) mencionam que a simulação termoenergética é um meio promissor para o projeto de edificações com melhor conforto térmico, menor consumo de energia e menor impacto ambiental, sendo uma análise que depende da integração de múltiplos objetivos para se alcançar o desempenho. Cada uma dessas vantagens seria um objetivo de otimização. Por isso, Deb et al. (2002) mencionam que esse problema passa a ter um conjunto de soluções ótimas (amplamente conhecidas como soluções ótimas de Pareto), ao invés de uma única solução. Desta forma, como há várias soluções ótimas, sem mais alguma informação adicional para ordenar as soluções, uma das soluções ótimas de Pareto não pode ser considerada melhor do que a outra.

Chen et al. (2016) utilizaram o jEPlus+EA e explicitaram que este mesmo algoritmo é altamente confiável para obter a fronteira de Pareto. Os autores apresentaram que a solução ótima final teria a mínima distância para o ponto de utopia investigado. Nguyen et al. (2014) corrobora com este método, relatando que a escolha da melhor solução não é trivial e que envolve muitas áreas do conhecimento (arquitetura, engenharia mecânica, ciências ambientais, economia, computação, etc.). O autor apresenta a distância ao ponto utópico como uma proposta para a escolha da melhor solução, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo gráfico com a melhor solução de Pareto pela menor distância ao ponto utópico



Fonte: Nguyen et al. (2014)

Evins (2013) apresentou uma revisão sobre os métodos de otimização computacional aplicados a projeto de construção sustentável. Neste estudo, o autor destacou Brownlee et al. (2011 apud EVINS, 2013), que comparou o desempenho de cinco algoritmos multiobjetivos (IBEA, MOCell, NSGA-II, SPEA2 e PAES) dentro de uma pesquisa aleatória em resolver um problema relativo a colocação da janela, e relatou que o algoritmo genético de classificação não denominado (*non-denominated sorting genetic algorithm - NSGA-II*) apresentou o melhor desempenho. Por fim, relatou sobre a importância da integração da simulação aos demais projetos relacionados à construção, por meio de uma otimização holística, através do crescimento dos processos de *Building Information Management* (BIM).

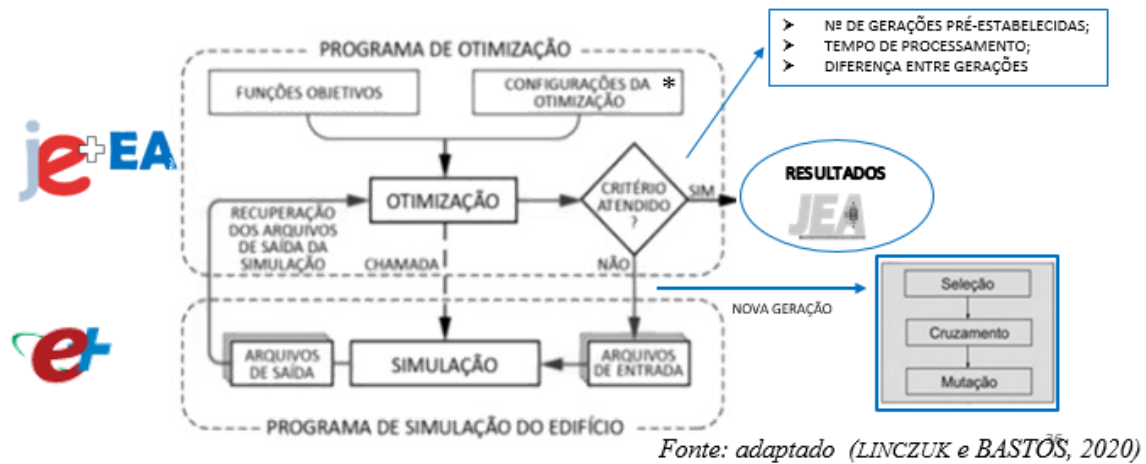
Bingham et al. (2019) analisaram a otimização multiobjetivo (custo de ciclo de vida e emissão de carbono) de uma residência com módulos solares fotovoltaicos e armazenamento em bateria nas Bahamas. Relataram que antes de utilizar os módulos solares deve-se melhorar a envoltória termicamente. Sugeriram estudos para verificar a viabilidade de uso de bateria para armazenamento de energia em comparação aos custos de outras fontes quando a demanda não é atendida pelos módulos solares. Os autores utilizaram o EnergyPlus e o jEPlus+EA.

Algoritmo genético

Segundo Linczuk e Bastos (2020), o algoritmo genético foi introduzido por Holland em 1975 e é apresentado conforme Figura 13. Segundo os autores, o processo de otimização neste caso inicia-se com a criação de uma população com tamanho definido, com boa distribuição dos parâmetros e se avaliam as funções-objetivo (denominada de *fitness*). Os

indivíduos que obtiveram melhores resultados têm seus genes mantidos durante os cruzamentos (*crossover*) que ocorrem para se verificar outros parâmetros. Novos indivíduos são então gerados e verificados em relação aos objetivos, novas mutações, em um processo cíclico (através de novas gerações), até que o critério de parada seja atingido.

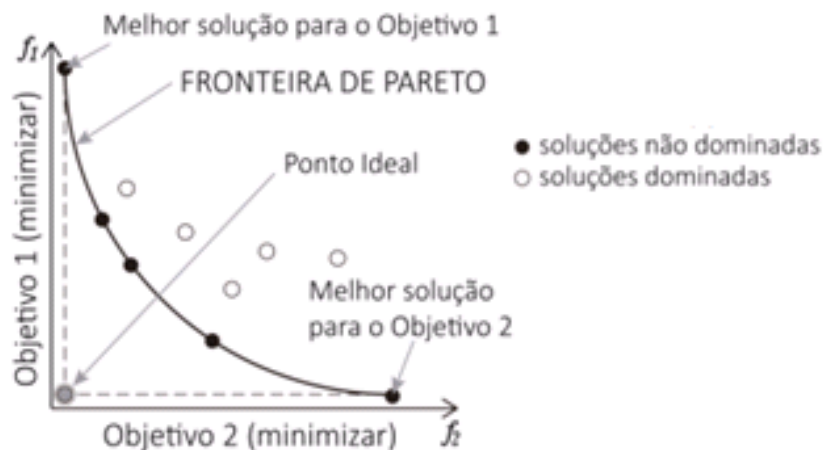
Figura 13 – Procedimento de execução do algoritmo genético de otimização dentro de todo o processo



Fonte: adaptado de Linczuk e Bastos (2020)

Ao fim do processo, o resultado geralmente é apresentado por meio do diagrama de Pareto, por um espaço formado pelas funções-objetivo (f_1 e f_2) do problema, conforme Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de Diagramas de Pareto



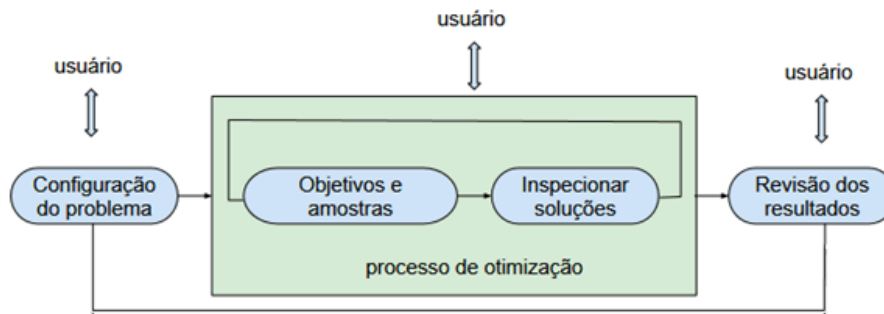
Nesta Figura 14, os autores apresentaram os melhores resultados para o Objetivo 1, o melhor resultado para o objetivo 2, o ponto ideal (fictício e não atingido), as soluções dominadas e as não dominadas.

Conforme Linczuk e Bastos (2020), diversos autores (DEB et al., 2002; NASSIF et al., 2004; BROWNLEE et al., 2011; EVINS, 2013; YU et al., 2015; BRE e FACHINOTI, 2017), apresentaram que o algoritmo genético NSGA-II se destaca pela diversidade de soluções que apresenta e pela eficiência na otimização do desempenho de edificações.

Hamdy *et al.* (2012 apud HAMDY, 2016) citaram que um algoritmo genético analisado duas vezes pode gerar resultados diferentes, por sua natureza estocástica, e que para garantir a precisão suficiente, devem executar um número muito grande de simulações. Após isso, complementaram que simulações muito detalhadas são desnecessárias e podem aumentar a probabilidade de insucesso (ATTIA et al., 2013; TENNE, 2012, apud HAMDY, 2016).

A partir de 2017 o jEPlus+EA dispõe do algoritmo NSGA-II, que possibilita uma otimização multiobjetivo em conjunto com parametrização (feita no jEPlus), e análise de sensibilidade. As simulações podem ser executadas localmente ou on-line por meio de um computador remoto e ainda fazer alterações de critérios durante a otimização (ZHANG; JANKOVIC, 2017), conforme Figura 15.

Figura 15 – Processo iterativo de otimização



Fonte: adaptado de Zhang e Jankovic (2017)

O algoritmo evolutivo de otimização multiobjetivo NSGA-II consiste em iniciar uma população com um número significativo de indivíduos. A cada iteração, é feita uma simulação e os resultados são classificados de acordo com os objetivos e restrições pré-estabelecidos, formando a Fronteira de Pareto. Enquanto os critérios de parada pré-estabelecidos não são satisfeitos, novas gerações são criadas, através da seleção e cruzamento dos indivíduos que geraram melhores resultados, denominadas mutações. Os critérios de parada, conforme opções disponíveis no jEPlus+EA, podem ser: pouca mutação entre uma geração e outra; número de iterações; horas de processamento ou estabilização da quantidade de novas soluções ótimas.

No trabalho de Linczuk e Bastos (2020) foi utilizado o algoritmo NSGA-II, integrado ao software jEPlus+EA com as seguintes configurações: 7 variáveis de construção com total de 180.000 possibilidades (8 orientações solares, 5 transmitâncias térmicas de parede, 4 absorvâncias solares da cobertura, 9 percentuais de área de janela, 5 proteções solares horizontais, 5 proteções solares verticais na esquerda e 5 proteções verticais na direita); tamanho de população inicial igual a 50; taxa de cruzamento (crossover) igual a 1; taxa de mutação igual a 0.2; tamanho da seleção de torneios igual a 2; executadas 100 gerações. As configurações seguiram as recomendações de Chen et al. (2016) e Mauro et al. (2015), atendendo ao tamanho populacional de duas a quatro vezes superior ao número de variáveis. Adotou-se um tamanho de população alta, para 50 indivíduos e, ao final, foram avaliados os tamanhos de população para 15 e 30 indivíduos, mantendo as demais configurações. Para 50 indivíduos iniciais, houve convergência na 45ª geração, para 15 indivíduos ocorreu na 90ª geração e para 30 ocorreu na 60ª. Desta forma, tanto o número de população inicial quanto o número de gerações interferem na convergência da otimização.

Segundo os autores, adotou-se um valor alto, de 100 gerações para se verificar com que antecipação a convergência ocorreria. Para a taxa de cruzamento, que se relaciona com

a frequência com que novas soluções são criadas mesclando recursos das soluções existentes, adotou-se um valor que corresponde a 100%. Um valor alto é desejável para proporcionar diversidade às soluções. Para a taxa de mutação é recomendado um valor baixo para que o algoritmo não se comporte como uma tentativa e erro aleatório. Adotou-se a taxa 0,20 (20%), que é o padrão do software. Quanto ao tamanho da seleção de torneios, adotou-se a recomendação do software de 2 torneios. Segundo os autores quanto maior o tamanho do torneio mais difícil o algoritmo se aproxima dos objetivos desejados. Nessa configuração, a seleção de torneios escolhe duas soluções aleatoriamente da população existente e mantém a melhor com base na qualidade do ajuste dos dados (*fitness*), ou aptidão, com base nas funções-objetivo estipuladas.

2.6. Considerações finais sobre a revisão da literatura

A revisão da literatura apresentou um breve histórico e as motivações pelo uso de contêiner neste trabalho, além dos principais parâmetros apresentados pelas normas e regulamentos técnicos sobre eficiência energética e conforto térmico. Foi destacado que estes documentos técnicos, mesmo não sendo específicos para contêineres, podem auxiliar para se atingir os objetivos deste trabalho.

Outro ponto destacado foi o crescente interesse do Exército no assunto, tendo em vista os trabalhos acadêmicos nesta área de pesquisa, em nível de mestrado.

Com relação aos métodos computacionais, principalmente o processo de simulação envolvendo análise de sensibilidade e otimização, através de leitura de artigos e manuais dos programas EnergyPlus, jEPlus, jEPlus+EA, análise de sensibilidade no JEA Web API e o método NSGA II, objetivos de otimização, ter-se-á mais segurança para se utilizar as ferramentas disponíveis para analisar os resultados apresentados pelos programas.

3. MÉTODO

Este capítulo descreve as etapas de desenvolvimento da pesquisa, os programas e parâmetros utilizados e as análises realizadas.

Inicialmente é apresentado o modelo computacional da edificação feito com plug-in OpenStudio 2.9.1. Por meio da exportação e importação do arquivo “idf”, o modelo é inserido no programa EnergyPlus 9.2.0.

Para complementar o modelo, algumas variáveis foram parametrizadas utilizando o jEPlus 2.1.0 para ampliar as possibilidades de uso do contêiner analisado por simulações computacionais. Em seguida, foram inseridos os dados climáticos e foram feitos alguns testes de simulação com alguns parâmetros aleatórios para testar as configurações utilizadas, no EnergyPlus e no jEPlus.

Na terceira etapa foram elaborados os modelos de otimização que serão processados no programa com o jEPlus+EA 2.1. Nesta etapa também foram inseridos os objetivos. Como parte do processo de otimização, foi feita análise de sensibilidade com as variáveis construtivas escolhidas. Através do JEA Web API, verificaram-se quais as variáveis de maior relevância e as de menor significância são retiradas. A partir disso, iniciou-se a otimização propriamente dita.

Na última etapa deste trabalho foram feitas as análises das saídas da otimização e foram feitas algumas considerações dos resultados. Como ferramentas, foram utilizadas o jEPlus+EA e o JEA Web API: Pareto, histogramas, diagrama de coordenadas paralelas e tabela de valores dos parâmetros com os respectivos valores de objetivos calculados. Além disso, para justificar alguns comportamentos, foram exportados dados de temperatura externa, temperatura média radiante, temperatura média interna, temperatura operativa, na fase de simulação.

3.1. Estudo de caso

3.1.1. Caracterização do objeto – contêiner de 20’

O contêiner de 20’ foi escolhido como objeto da análise por ser um módulo mais fácil de transportar e ter um saldo positivo na balança de movimentação do contêiner (com número maior de importação do que o de exportação).

O protótipo foi modelado com o uso do plug-in OpenStudio, como uma única zona térmica e com módulos solares fotovoltaicos, apenas para considerar o efeito destas como sombreamento da cobertura (objeto Shading:building). O protótipo tem um uso destinado a um escritório em horário comercial. Foi considerado um contêiner de 20' de comprimento, 8' de largura e altura variável, conforme apresentado na Figura 16. Em relação aos parâmetros de envoltória a serem analisados, será exposto mais adiante.

Figura 16 – Contêiner utilizado para fins militar em campanha em módulo dual com placa solar



Fonte: Autor (2021)

Como exemplo, na Tabela 6 temos os Fatores de Forma (FF, cf. Equação 4) de contêiner com 2,4 m de altura e com 2,7 m de altura. Pelo exemplo, o contêiner de 2,4 m apresenta maior FF. Para fins didáticos, foram considerados alguns valores de altura do contêiner entre estes dois limites.

Tabela 6 – Valores de FF para contêineres de diferentes alturas de containeres

Comprimento	Largura	altura	área, env	volume	FF
6 m	2,4 m	2,4 m	69,1 m ²	34,6 m ³	2,0 m
		2,7 m	74,2 m ²	38,9 m ³	1,9 m

Fonte: Autor (2021)

3.1.2. Caracterização do local da pesquisa

Primeiro foram gerados os dados de otimização do contêiner considerando sua localização em Campo Grande – MS. Em seguida, foram gerados os dados de otimização considerando os mesmos parâmetros e objetivos, mas considerando o contêiner em Boa Vista – RR (onde está ocorrendo a Operação Acolhida aos Venezuelanos refugiados).

Conforme será apresentado a seguir, as duas cidades têm climas bem diferentes e será mostrado o impacto (no consumo de energia e desempenho térmico) ao se utilizar um contêiner projetado para uma cidade ser utilizado em outra, sem as devidas adaptações.

Para isso, serão utilizados arquivos climáticos do INMET (LABEE, 2018). A Tabela 7 traz as informações de Latitude, Longitude, Zona Bioclimática e Grupo Climático. Para efeito de estudo, o local de implantação será caracterizado como em região acidentada, arborizada ou subúrbio.

Tabela 7 – Dados do local da pesquisa

Arquivo climático [BRA_INMET]	MS_Campo.Grande.Intl.AP. 868100	RR_Boa.Vista. 816150
Latitude [°]	-20,47	2,8
Longitude [°]	-54,67	-60,65
Fuso horário [h]	-4	-4
Elevação [m]	556	90
Zona Bioclimática [NBR 15220-3 (2005)]	6	8
Grupo climático [INI-C (2021)]	10	17

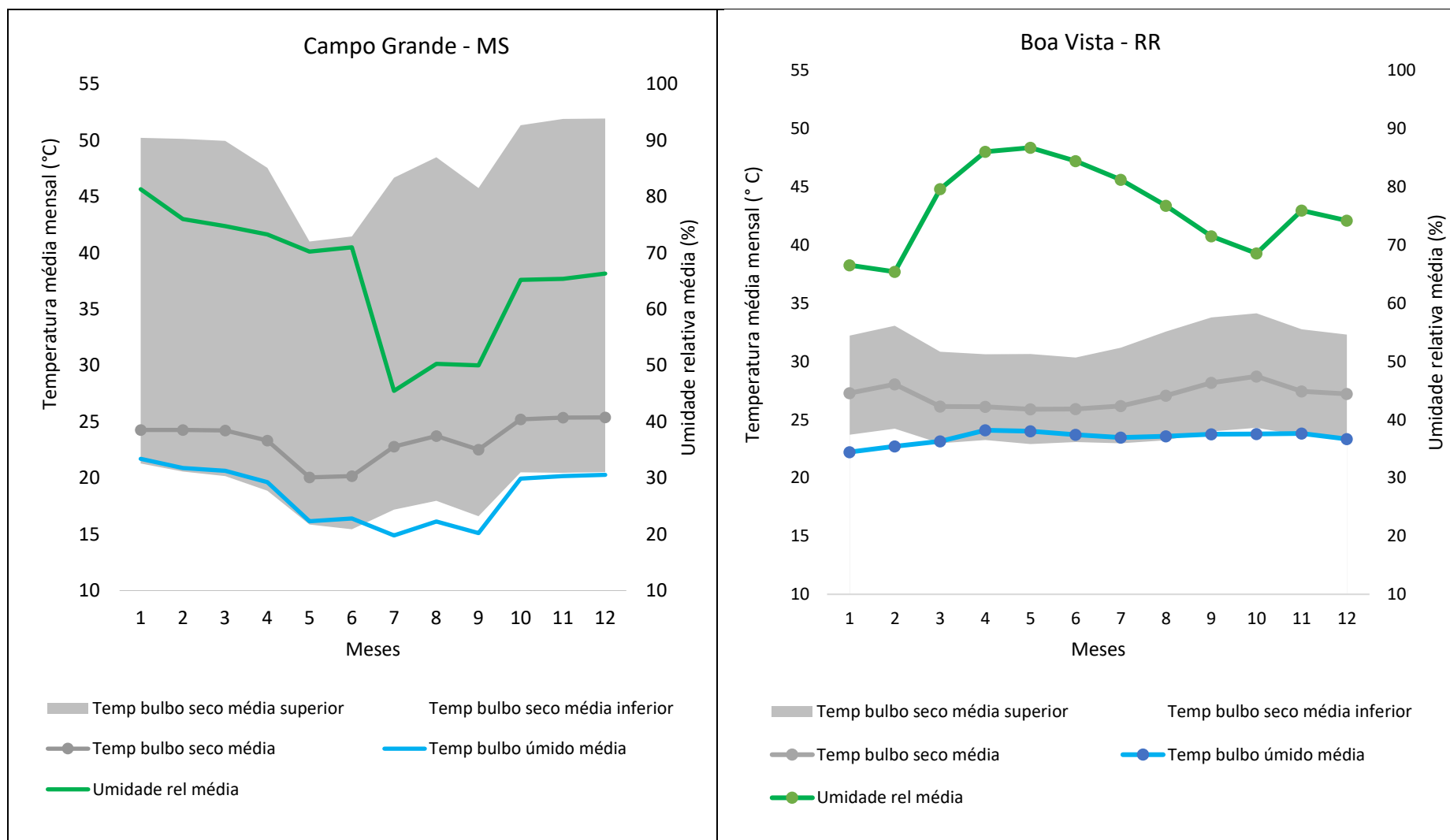
Fonte: autor (2021)

As figuras a seguir, Figura 17 e Figura 18, apresentam as temperaturas médias mensais, máximas e mínimas; além da zona de conforto térmico, das cidades em estudo, segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) tratados pela plataforma pública *ProjetEEE – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes (PROJETEEE, 2020)*.

A temperatura de bulbo úmido em Campo Grande-MS teve médias mensais entre 15 °C e 20 °C. Em Boa Vista-RR as médias mensais entre 22 °C e 23 °C. As temperaturas de bulbo seco ficaram entre 21 °C - 25 °C e 26 °C - 28 °C, respectivamente. Campo Grande-MS apresentou maior variação de temperatura principalmente no inverno e Boa Vista apresenta menor variação de temperatura e mais quente.

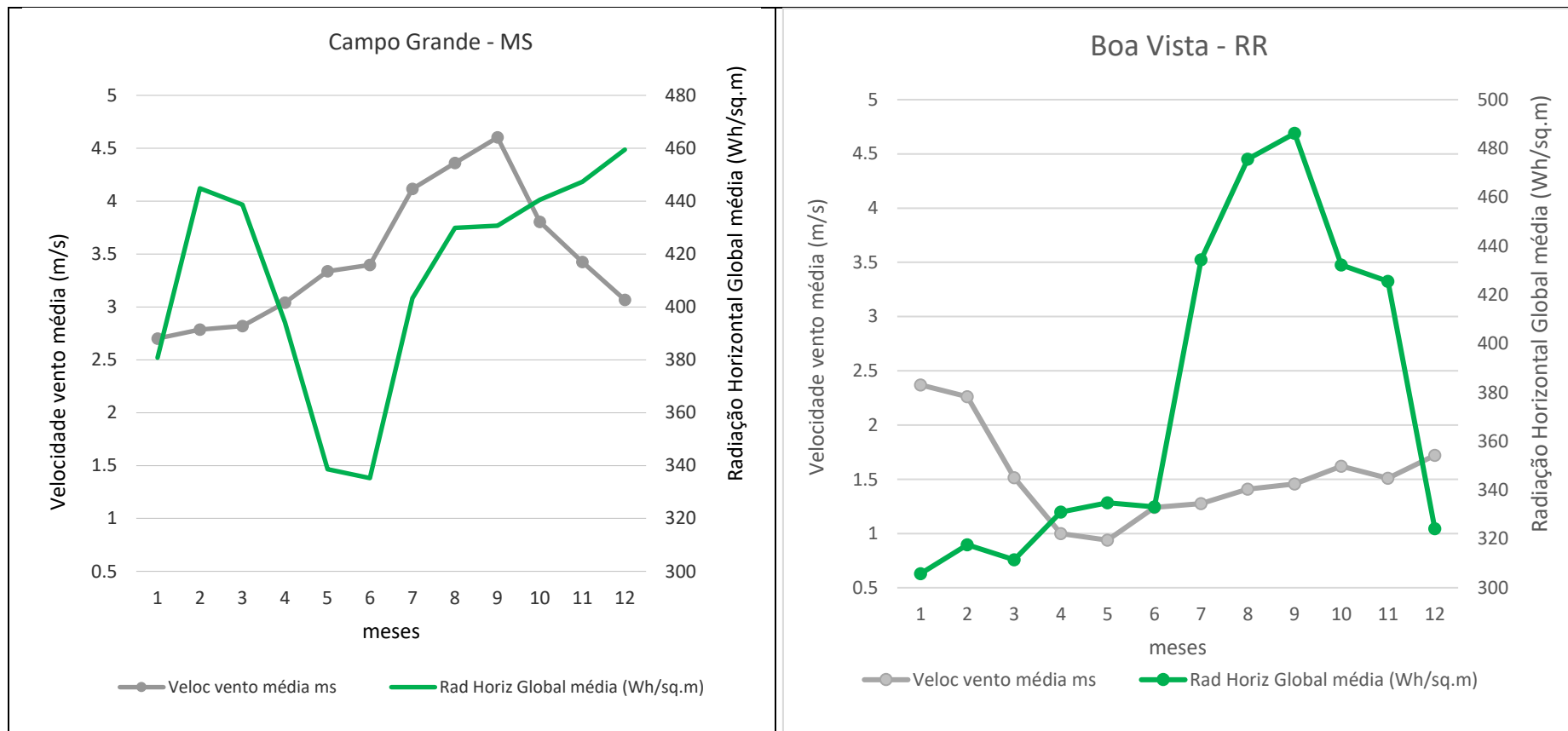
Como as duas cidades estão em hemisférios terrestres diferentes, na capital situada no hemisfério Sul, as precipitações são mais frequentes de Dezembro a Março. Na cidade do hemisfério Norte, as precipitações são mais frequentes de março a julho e tem maior intensidade pluviométrico. Parecido a essa variação está a radiação global horizontal média mensal e a umidade relativa do ar.

Figura 17 – Dados médios de temperaturas mensais e umidade relativa média de Campo Grande-MS e Boa Vista-RR, elaborados com arquivos climáticos “INMET 2018”



Fonte: INMET, 2018

Figura 18 – Dados médios mensais de velocidade do vento e radiação horizontal global de Campo Grande-MS e Boa Vista-RR, elaborados com arquivos climáticos “INMET 2018”



Fonte: INMET, 2018

3.2. Configurações da simulação computacional

Para fins de rotinas de uso, não foram considerados feriados e finais de semana, devido à natureza intermitente do serviço militar.

Foram considerados como dias de projeto: 21/12 (verão) e 21/7 (inverno), com informações climáticas específicas do arquivo *ddy* do arquivo climático INMET de Campo Grande – MS e Boa Vista – RR (Tabela 8). Os dias de projeto foram utilizados nas simulações preliminares visando o dimensionamento da carga térmica do sistema de condicionamento de ar.

Tabela 8 - Dados dos dias utilizados em projeto para verão e inverno para cidade Campo Grande-MS

Dados	Campo Grande - MS		Boa Vista - RR	
	Dia de inverno	Dia de verão	Dia de inverno	Dia de verão
Dia / mês	21/7	21/11	21/11	21/7
Temp bulbo seco máxima (° C)	19,4	36,2	35,8	33,8
Velocidade do vento (m/s)	6,0	4,9	3,8	2,1
Direção do vento (graus)	180	330	90	90

Fonte: programa Energyplus pelo autor (2021)

A temperatura do solo raso foi adotada do arquivo *epw*, que mostra as temperaturas médias mensais, sendo que foi utilizado o modelo do *Ground Domain:Slab* com o algoritmo de *Finite Difference* para o cálculo das transferências de calor entre o objeto e o solo, conforme parâmetros da Tabela 9.

Tabela 9 – Configuração da transferência de calor com o solo, por diferença finita – 1D

Campo	Unidade	Valores
Condutividade térmica do solo	W/m.K	0,7
Densidade do solo	Kg/m ³	1.500
Calor específico do solo	J/kg.K	800
Profundidade do domínio do solo	m	10,0
Distância do perímetro da laje ao perímetro do domínio	m	5,0
Nível da laje de solo	Nível do fundo da laje com superfície do solo	

Fonte: Tela tirada do programa Energyplus pelo autor (2021)

Os dados considerados para os materiais foram adotados da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005b) e estão apresentados na Tabela 10.

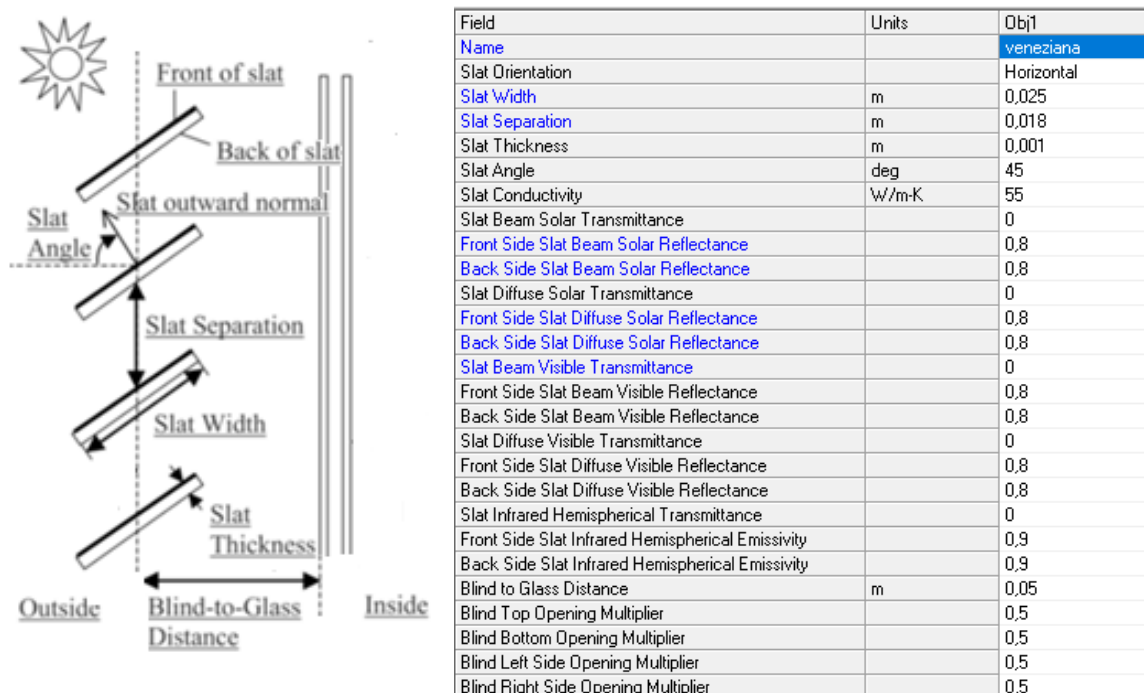
Tabela 10 – Características dos materiais e das configurações utilizadas na construção dos modelos

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Massa específica [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]
Chapa de aço: parede e cobertura	0,002	55	7800	460
Placa de gesso – revestimento	0,015	0,35	900	840
Piso de borracha	0,005	0,4	900	1600
Compensado naval – piso	0,020	0,17	650	2300
Lã de vidro – parede	Variada	0,045	20	700
Poliuretano – parede e cobertura	0,035	0,030	40	1500
Material	Absortância [α]	Emissividade (ϵ)*		
Folha de alumínio (parede)	0,05	0,05		
Pintura:	0,20	0,90		
	0,40	0,90		
	0,97	0,90		
<i>* de acordo com ENERGYPLUS (2014), para troca radiante de comprimento de onda longo, a emissividade é igual à absortância térmica.</i>				
Camada de ar	Espessura [m]	Emissividade	Fluxo	Resistência Térmica R _{ar} (m ² .K/W)
Parede	0,05	$\epsilon < 0,20$	horizontal	0,37
		$\epsilon > 0,80$		0,16
Cobertura	0,20	$\epsilon > 0,80$	descendente	0,61
Vidros	Espessura [m]	Transmitância solar normal	Refletância solar normal	Transmitância visível normal
Clear 3mm	0,003	0,837	0,075	0,898
Clear 6mm	0,006	0,775	0,071	0,881
Bronze 6mm	0,006	0,482	0,054	0,534
Green 6mm	0,006	0,487	0,056	0,749

Fonte: adaptado de NBR 15220-2 (ABNT, 2005b)

Para a proteção das janelas, foram considerados duas opções: toldo articulado feito com material do próprio contêiner (*shading overhang*) ou veneziana externa horizontal. A veneziana externa foi configurada conforme apresentou Soares (2014): condutividade 0,23 W/m.k e refletância de 50 %. A veneziana foi modelada no EnergyPlus usando o objeto *WindowMaterial:Blind* e inserido externamente junto à janela de vidro, conforme Figura 19.

Figura 19 Detalhe da veneziana inserida com a janela

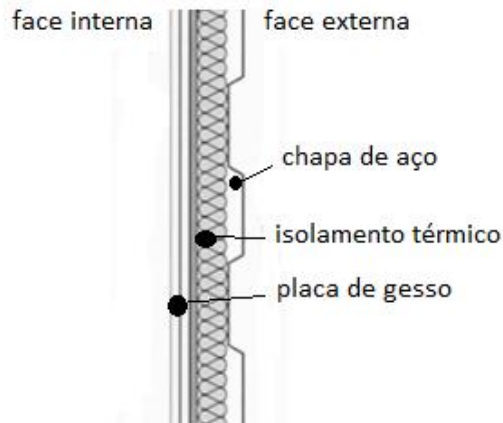


Fonte: Energyplus (2014) adaptado

Os materiais apresentados na Tabela 10 foram utilizados formando componentes construtivos e sintetizados na Tabela 11, conforme segue:

- Cobertura – foram considerados dois tipos: ambos com módulo solar fotovoltaico (considerado como sombreamento da cobertura), a cobertura do contêiner composta por uma chapa de aço (externamente), isolamento térmico com poliuretano e placa de gesso (acabamento interno); a outra opção será a inclusão de uma cobertura auxiliar, separado do contêiner em 20 cm, adicionado à cobertura existente do contêiner especificado anteriormente (sem os módulos solares). Foram analisadas três cores para as faces externas com absorvâncias solares diferentes, com absorvâncias solares diferentes, conforme Tabela 10.
- Paredes – foram consideradas paredes com chapa de aço (camada externa), chapa de alumínio ou não, isolamentos de lã de vidro em várias espessuras (conforme Tabela 10) e acabamento interno em placa de gesso. Foram analisadas três cores para as faces externas com absorvâncias solares diferentes, conforme Tabela 10. A Figura 20 representa o esquema de uma parede, vista em planta.

Figura 20 – vista em planta de uma parede com suas camadas



Fonte: Autor (2021)

- Piso – Foi analisado um piso em chapa de aço, compensado naval e piso de borracha (internamente), contato do contêiner com o solo: todo o piso diretamente ao solo (com brita);
- Janelas – Foram consideradas uma ou duas janelas com vidros de fator solar variável; com ou sem veneziana externa; controlada por *setpoint* da climatização.

Tabela 11 – Dados construtivos e emprego dos materiais:

Construções	Descrição: os primeiros são os mais externos à edificação
Cobertura	- Módulos solares fotovoltaicos - Chapa de aço com poliuretano + placa de gesso (teto do contêiner) ou - Chapa de aço isolada + camada de ar + chapa de aço com poliuretano + placa de gesso - Diferentes absorvâncias cf. Tabela 10
Paredes	- Chapa de aço com camada de ar + folha de alumínio + lã de vidro (espessura variável, cf. Tabela 10) ou poliuretano + placa de gesso - Diferentes absorvâncias cf. Tabela 10
Piso	- Chapa de aço + compensado naval + piso de borracha. - Junto ao solo (radier)
Janelas	- Uma ou duas janelas, de tamanhos variáveis - Vidro (fator solar, cf. Tabela 13) - Com ou sem veneziana externa - Com ou sem toldo metálico

Fonte: Autor (2021)

As rotinas de operação dos sistemas estão apresentadas na Tabela 12, e foram adotadas conforme INI-C (BRASIL, 2021), NBR 16.401-1 (ABNT, 2008a) e NBR 16.401-3 (ABNT, 2008b).

Tabela 12 – Rotinas de ocupação e operação utilizadas nas simulações

Valores utilizados – cronograma	Entre 7h e 17h (uso de escritório)
Níveis de atividades (W/pessoa)	115
Velocidade do ar interna (m/s)	0,1
Iluminação	40 W e 0,2 de fração radiante
Equipamentos (W)	300
Taxa de ocupação (pessoas)	4
Vestimentas (clo)	<i>DynamicClothingModelASHRAE55</i>
Modelo de conforto térmico	Ambiente climatizado: Fanger

Fonte: Autor (2021)

Como apontado por Viana (2018), foi configurada uma taxa de infiltração por frestas de 1 ren/h, que dá aproximadamente 0,01 m³/s (volume estimado do contêiner = 37m³), 24 h/dia.

Para a ventilação, aquecimento e ar-condicionado (*HVAC - Heating, Ventilating and Air Conditioning*) foi configurada uma rotina híbrida, sendo que abaixo de 18° C deve-se ligar o sistema de aquecimento; a partir de uma temperatura de setpoint é ligado sistema de resfriamento e entre esses valores o sistema fica desligado. Foi utilizado o *Packaged Terminal Air Conditioner* (PTAC) com uma serpentina de resfriamento DX, uma serpentina de aquecimento elétrico, com misturador de ar externo conforme parâmetros padrão do EnergyPlus. A fração do ar exterior relacionado às pessoas pode ser considerada 0,0038 m³/s.pessoas e a fração do ar por área útil pode ser considerada 0,5 L/s.m² (nível 3 para escritório da Tabela 1 da ABNT NBR 16.401-3).

3.3. Avaliação do desempenho do contêiner

Foram analisadas as variáveis encontradas nas melhores soluções (soluções ótimas para cada objetivo) para cada cidade e os possíveis pontos mais próximos do ideal, conforme exposto na Figura 14, para os objetivos em estudo.

3.4. Simulação computacional

As simulações computacionais foram feitas em um computador com processador Intel Core i5-4460 CPU 3.2GHz, com padrões de parada: máximo de 100 gerações, máximo de 1.000 casos de simulação, 100 horas de CPU (processamento).

A partir de uma configuração simplificada de um contêiner, o modelo foi testado no EnergyPlus, para verificar os impactos de algumas alterações nos valores de temperatura

interna, consumo de energia anual para climatização, percentuais médios preditos de insatisfação dos usuários e horas de desconforto térmico por ano.

A partir desse teste, foram verificadas as respostas para algumas variações na envoltória em relação às temperaturas internas, consumo de energia para climatização e insatisfação dos usuários quanto ao desempenho térmico.

Configuração inicial (0_contêiner_simples): sem veneziana; com uma janela; sem cobertura na janela (toldo); parede composta de chapa de aço, camada de ar, chapa de gesso e sem isolamento térmico; cobertura simples; sem placa solar; sem folha de alumínio dentro da parede; com troca de calor com o solo e com ar-condicionado, em Campo Grande - MS.

Configurações simuladas: 1. inclusão de uma veneziana; 2. inclusão de mais uma janela em parede oposta à primeira; 3. inclusão de uma cobertura na janela (toldo); 4. inclusão de uma isolante térmico de 7,5 cm de espessura de lã de vidro na parede; 5. inclusão de um telhado duplo por meio de uma chapa de aço e uma camada de ar; 6. inclusão de uma placa solar sobre o telhado sombreando-o; 7. inclusão de uma folha de alumínio na parede após a chapa de aço; 8. inclusão de uma sapata isolando o contêiner do solo; 9. retirada do ar-condicionado.

3.4.1. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada pelo método de Morris. Neste estudo de caso foram considerados 12 parâmetros (k) em 4 níveis de variação (p) cada, conforme a Tabela 13. A população inicial foi de 30, 10 *gens* a cada geração, taxa de crossover 80%, taxa de mutação de 20%, tamanho do torneiro: 2 e 100 gerações.

Tabela 13 – Parâmetros a serem analisados totalizando 16.777.216 possibilidades

Parâmetro	Valores
P1 - Orientação ao eixo Norte [graus]	0, 90, 180, 270
P2 - Absortância solar nas paredes [-]	0,3; 0,5; 0,7; 0,9
P3 - Espessura revestimento de parede [cm]	zero; 2,5; 5,0 e 7,5
P4 - Transmitância solar dos vidros nas janelas [-]	0,6; 0,7; 0,8; 0,9
P5 - Alturas de contêiner [m]	2,4; 2,5; 2,6 e 2,7
P6 - Tamanhos de janela 1 [m ²]	0, 2, 4 e 6
P7 - Tamanhos de janela 2 [m ²]	0, 2, 4 e 6
P8 - Ângulo de Sombreamento na janela 1 [°]	90, 120, 150, 180
P9 - Ângulo de Sombreamento na janela 2 [°]	90, 120, 150, 180
P10 - Absortância solar na cobertura [-]	0.3, 0.5, 0.7, 0.9
P11 – Setpoint para acionamento do ar condicionado [°C]	23, 24, 25, 26
P12 – Taxa de infiltração de ar no contêiner [1/h]	1, 2, 3, 4

Fonte: Autor (2021)

Foram utilizadas as formas gráficas do JEA Web API: Dispersão, Regressão Linear, Morris, no site EnSimS web tools, que recebe automaticamente as saídas do jEPlus+EA. As variáveis de menor influência não serão analisadas na otimização. Foi utilizado o critério qualitativo para a definição da influência de cada variável.

3.4.2. Otimização

Após a análise de sensibilidade, os parâmetros mais significativos foram analisados pelo algoritmo NSGA-II, no jEPlus+EA.

Os parâmetros considerados para a otimização serão: algoritmo NSGA-II, método de amostragem Hipercubo Latino (*Latin Hypercube Sampling*), tamanho da população inicial 30, 20 *gens* a cada geração, taxa de crossover 100%, taxa de mutação de 20%, tamanho do torneiro de 80 gerações.

3.4.3. Funções-objetivo

As combinações das variáveis foram otimizadas com o programa jEPlus+EA, sem restrições definidas e com três objetivos: (*t1*) minimizar o consumo anual de energia para climatização do contêiner, (*t2*) minimizar o percentual médio predito de insatisfeitos conforme modelo de Fanger e (*t3*) minimizar o número de horas em desconforto conforme ASHRAE 55.

3.5. Análise de resultados

Os dados serão analisados com o gráfico de Pareto, em 2d, com eixos representando pares com os objetivos *t1*, *t2* e *t3* e Coordenadas Paralelas, representando 1d apenas, individualmente, os melhores resultados para cada objetivo.

3.6. Considerações

Após a primeira análise realizada, um artigo foi submetido e aprovado no ENCAC 2021 (DE DEUS; SILVA, 2021). A partir deste estudo, pode-se ter uma ideia das principais variáveis na análise da envoltória do contêiner para uso na cidade de Campo Grande-MS. Os resultados apresentaram quantidade de horas de desconforto anuais muito elevadas, o que acarretou mais pesquisas bibliográficas.

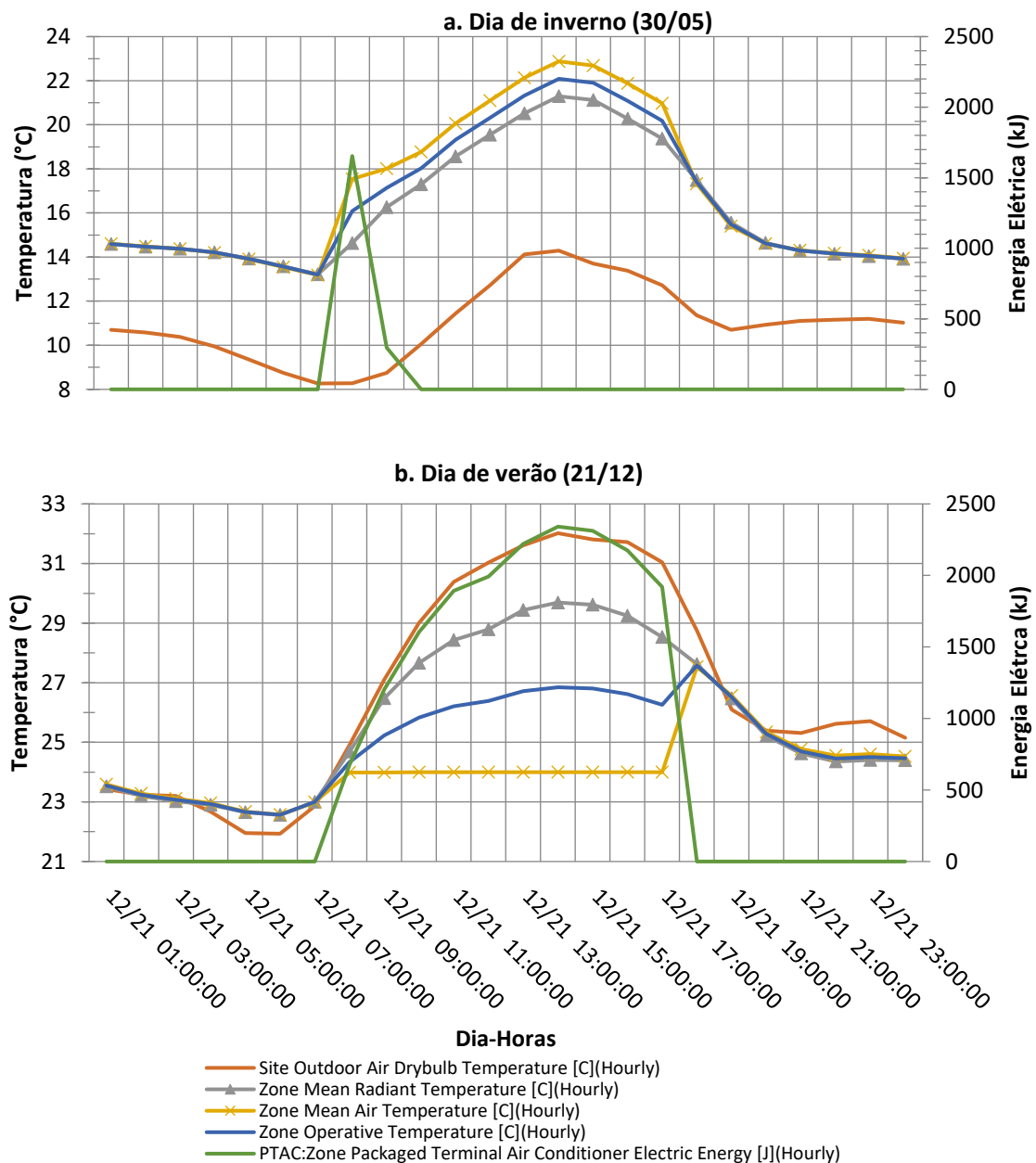
Devido à grande quantidade de parâmetros e níveis, e em complementação à revisão bibliográfica, foi inserido neste estudo a análise de sensibilidade das variáveis visando melhorar o processo de otimização em comparação às variáveis mais significativas.

4. RESULTADOS

4.1. Análise do contêiner por simulação e modificações simplificadas

Em primeiro lugar é importante mostrar o comportamento das temperaturas externas, médias radiantes, média interna e operativa para o contêiner com a seguinte configuração inicial (0_contêiner_simples). A Figura 21 apresenta as temperaturas para um dia de inverno e outro de verão e o consumo horário de energia para climatização, para cidade de Campo Grande-MS,

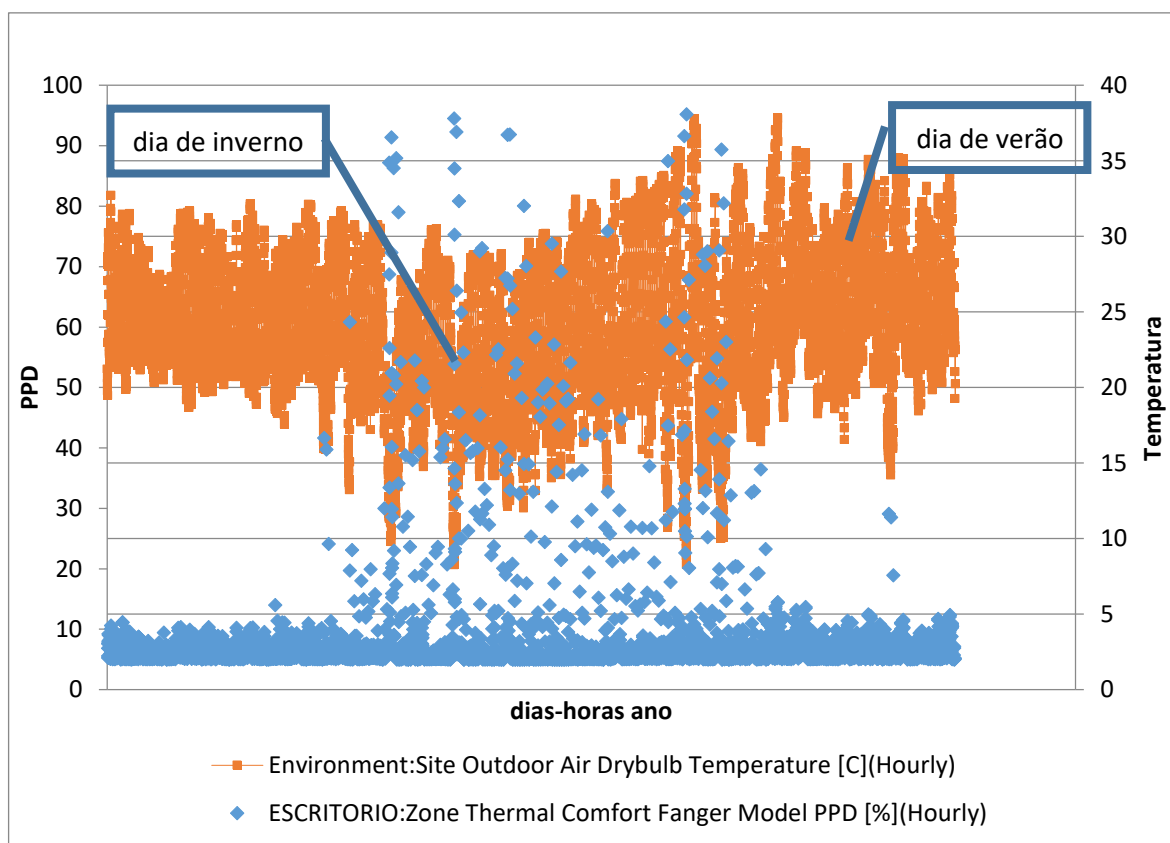
Figura 21 – Temperaturas para dias típicos de verão e inverno em Campo Grande-MS



Pela Figura 21, no inverno, o climatizador é ligado para aquecer o contêiner e no verão é ligado para esfriar, de acordo com o setpoint utilizado. O consumo com resfriamento foi muito maior quando comparado com o consumo para aquecimento. Neste caso específico, no inverno o aquecimento ficou ligado num curto período de tempo.

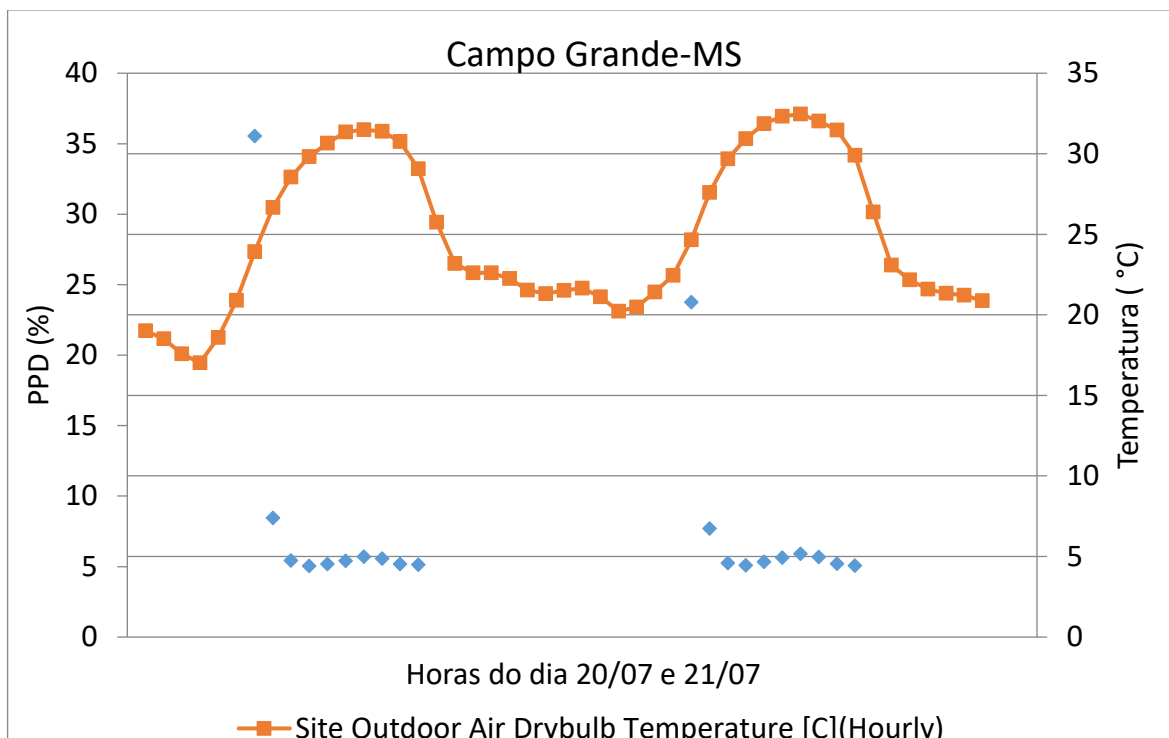
Com relação ao PPD, conforme a Figura 22, os piores dias são próximos ao dia típico de inverno. Tal fato se justifica, em parte, pelo uso da vestimenta dinâmica conforme ASHRAE 55, que não é apropriada para esta situação, mas é a única dinâmica no Energyplus. A ASHRAE 55 é para ambientes ventilados e os valores da vestimenta dinâmica são considerados de acordo com a Figura 7.

Figura 22 – Valores de PPD e Temperatura externa para o ano inteiro de projeto para Campo Grande



Analisando dois dias consecutivos, no inverno (Figura 23), período que teve mais pontos de PPD > 10 %, pode-se justificar pelo fato dos aparelhos de climatização não estarem ligados antes das 7h da manhã.

Figura 23 – Detalhe de dois dias de inverno com PPD e Temperatura para Campo Grande-MS



A seguir, foram analisadas nove novas situações diferentes apresentadas no tópico 3.4, todas a partir da configuração inicial. Foram analisadas as temperaturas médias, PPD e consumo de energia elétrica para climatização. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o resultado para a temperatura operativa mediana e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa os resultados para o Desempenho Térmico segundo PPD.

Figura 24 – Temperaturas operativas para as 10 simulações

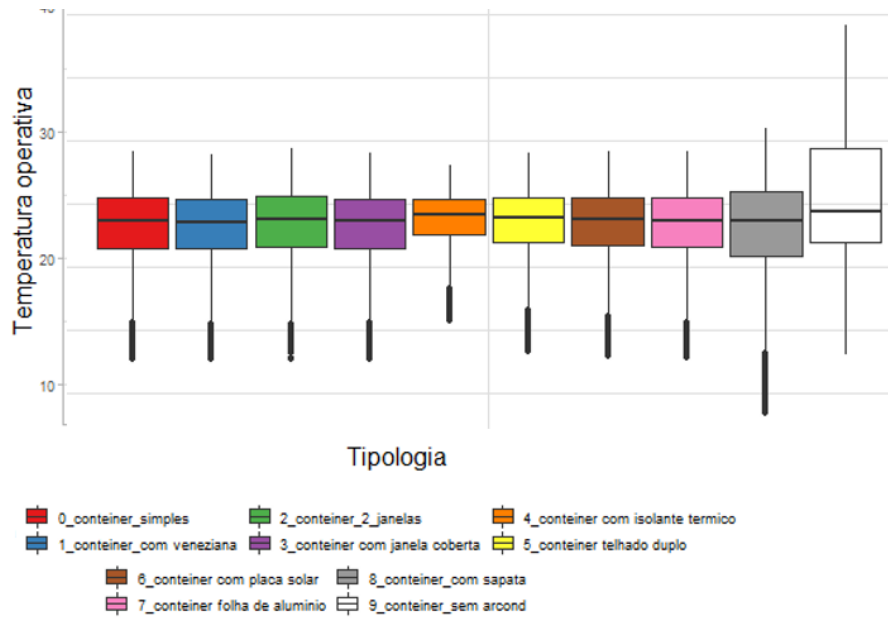
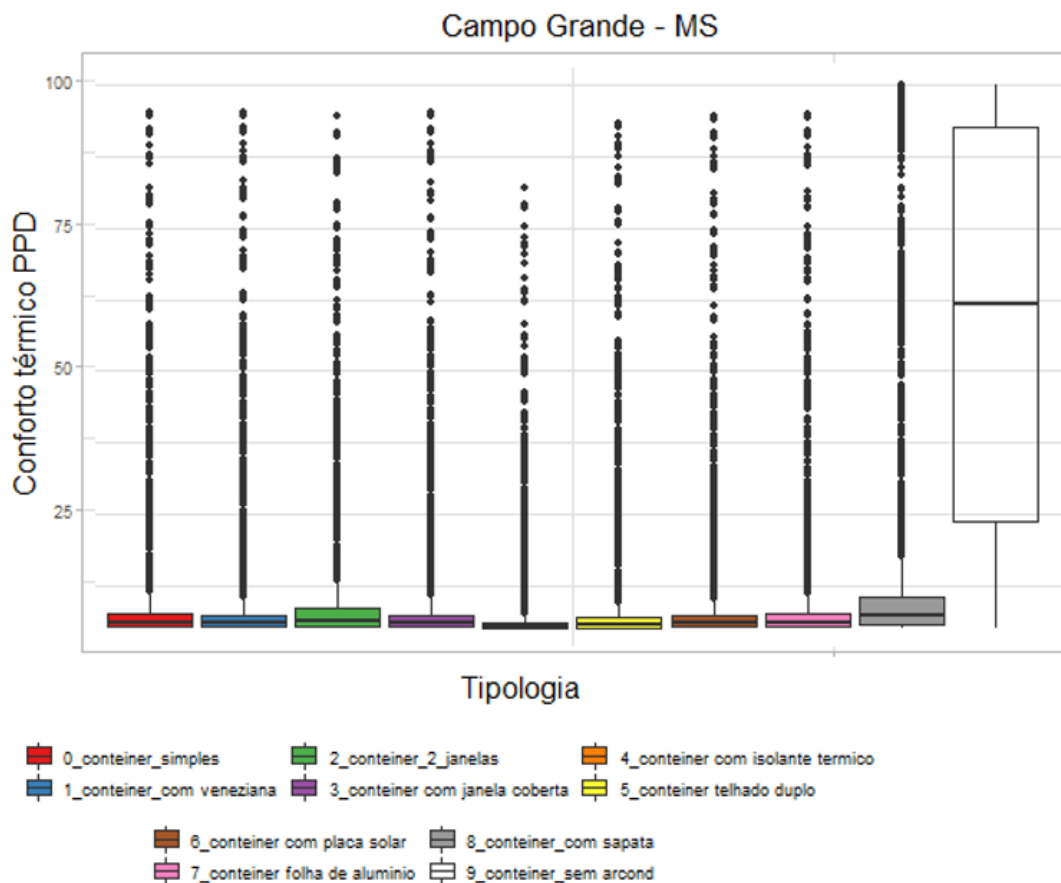


Figura 25 – Resultado das 10 simulações para Desempenho Térmico segund PPD



O contêiner sem ar-condicionado apresentou as maiores temperaturas e o maior percentual de pessoas insatisfeitas. Outro que apresentou uma piora nos parâmetros analisados foi o caso da inclusão de mais uma janela (sem proteção solar), pois a área de

vidro transmite mais calor para dentro do contêiner que a parede do contêiner. Este fato é corroborado quando se inclui uma veneziana (tipo 1) ou se cobre a janela (tipo 3), pois estas duas configurações apresentaram melhora no PPD e no consumo de energia.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta valores médios anuais de temperaturas, PPD e de consumo de energia elétrica para condicionamento do ar nos contêineres. Foram inseridos valores de porcentagens relativas aos valores comparados à configuração 0_contêiner_simples. – Valores médios anuais e porcentagens em relação ao contêiner_simples

Tabela 14 – Valores relativos das nove variações em relação ao contêiner_0

Configurações	Temp externa (°C)	Temperatura média radiante (°C)		Temperatura ar interna (°C)		PPD modelo Fanger (%)		Energia elétrica condicionamento de ar (kJ)	
0_contêiner_simples	25,76	25,65	-	23,99	-	7,15	-	801,52	-
1_contêiner_com veneziana	25,76	25,47	-1%	23,93	-	6,66	-7%	760,77	-5%
2_contêiner_2_janelas	25,76	25,92	1%	24,07	-	8,00	12%	854,27	7%
3_contêiner com janela coberta	25,76	25,54	-	23,96	-	6,79	-5%	768,21	-4%
4_contêiner com isolante térmico	25,76	25,70	-	24,27	1%	5,75	-19%	693,45	-13%
5_contêiner telhado duplo	25,76	25,71	-	24,14	1%	6,46	-10%	767,27	-4%
6_contêiner com placa solar	25,76	25,65	-	24,07	-	6,63	-7%	768,91	-4%
7_contêiner folha de alumínio	25,76	25,65	-	24,00	-	7,07	-1%	791,69	-1%
8_contêiner_com sapata	25,76	25,69	-	23,83	-1%	8,87	24%	875,59	9%
9_contêiner_sem arcond	25,76	27,56	7%	28,00	17%	77,73	988%	0	-

Pela análise das médias apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o contêiner com a janela com veneziana apresentou melhores resultados se comparado ao caso da proteção da janela com cobertura, sendo ambos melhores do que o contêiner sem nenhuma proteção nas esquadrias.

O contêiner com isolante térmico apresentou a melhor configuração. Com a finalidade de racionalizar materiais, na fase de otimização serão verificadas diferentes espessuras de revestimento a fim de minimizar a quantidade de materiais sem afetar o conforto e a economia de energia.

Em relação ao contêiner com telhado duplo, este apresentou melhor resultado do que o contêiner sombreado apenas com placa solar. Contudo, na otimização será analisado apenas o contêiner com telhado simples, sem placa solar, para verificar as influências das outras variáveis sem proteção na cobertura.

O contêiner com apenas duas janelas e sem proteções apresentou piores resultados, quando comparado com o contêiner com apenas uma janela. Tal resultado era esperado pois não foi considerado ventilação cruzada e o vidro tem piores características térmicas se comparado à parede do contêiner. Nos próximos passos, serão consideradas coberturas nas duas janelas.

O contêiner com a folha de alumínio dentro da parede teve pouca melhora e não será mais considerado nas próximas etapas. O contêiner com sapata teve uma piora pois não houve troca de calor com o solo. O contêiner sem ar-condicionado apresentou-se inviável de ser ocupado, pois teve um percentual de desconforto muito alto.

Com este breve estudo, de simulação, pode-se passar para a Análise de Sensibilidade pelo método de Morris desconsiderando alguns fatores e incluindo outros, para verificar quais parâmetros realmente interferem nos objetivos estudados.

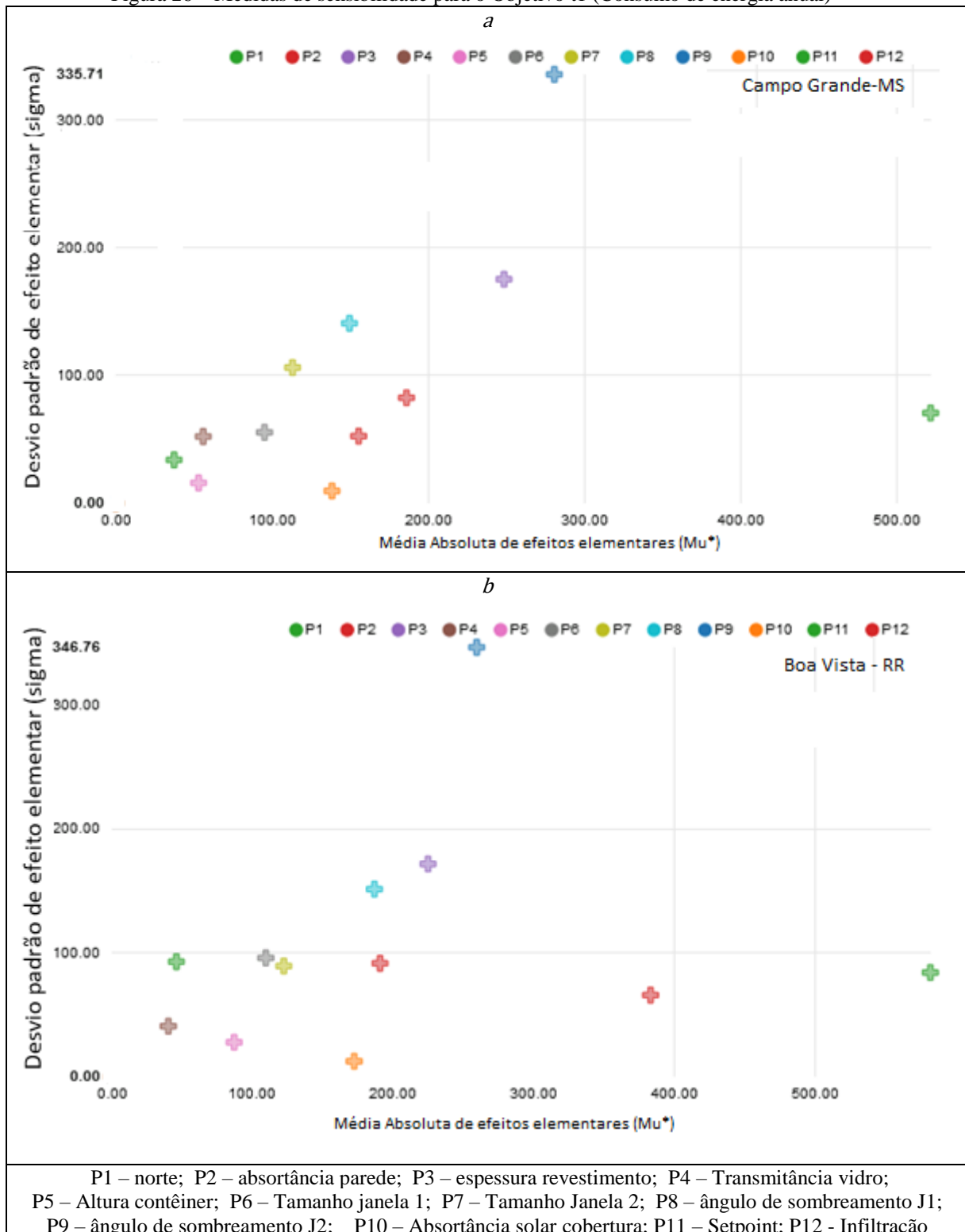
4.2. Análise de sensibilidade pelo método de Morris

Após o estudo de diferentes alternativas isoladamente, foi feita uma análise de sensibilidade, pelo método de Morris, com 12 parâmetros (P), conforme Tabela 12, tamanho da amostra igual a 30, população inicial igual a 20 e um total de 330 casos / simulações.

Para os objetivos anteriormente mencionados, minimizar o consumo de energia anual para climatização (objetivo $t1$), minimizar o percentual médio anual predito de insatisfeitos termicamente (objetivo $t2$) e minimizar a quantidade de horas em desconforto térmico por ano (objetivo $t3$), para Campo Grande-MS e Boa Vista-RR, foram obtidos os resultados apresentados nas Figura 26, Figura 27 e Figura 28, exportadas diretamente do jEPlus+EA para o site EnSimS. Como mencionado, no eixo das abscissas são representados os valores das médias absolutas de efeitos elementares e nas ordenadas são representados os valores dos desvios padrões de efeitos elementares.

De acordo com Morris, quanto maior o valor da média absoluta, mais influências aquele parâmetro P sobre as variáveis dependentes (objetivos). Em relação às ordenadas, quanto maior o desvio padrão, maior a não linearidade do Parâmetro.

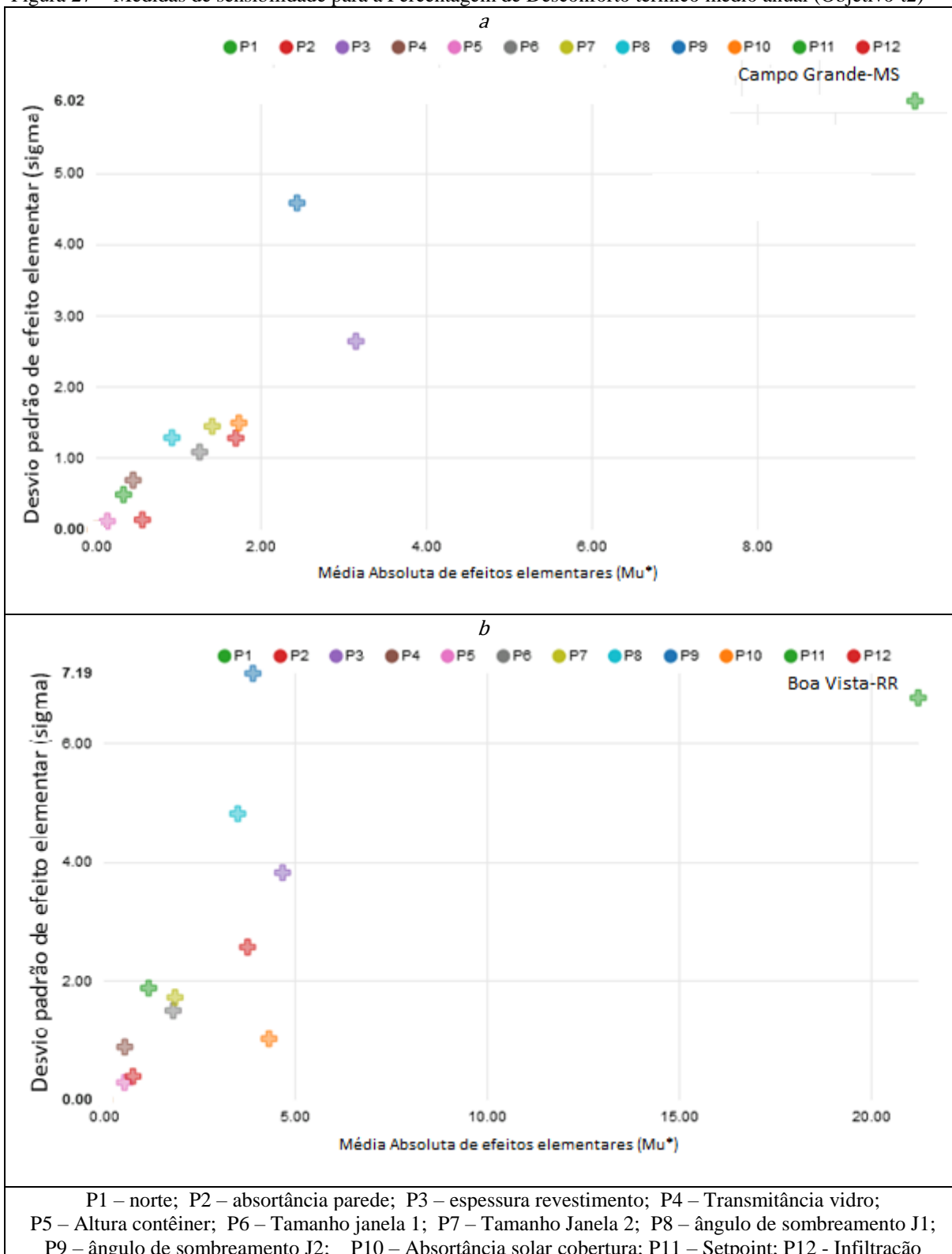
Figura 26 – Medidas de sensibilidade para o Objetivo t1 (Consumo de energia anual)



No caso das Figura 26.a e 26.b, os parâmetros P1, P4 e P5 apresentaram menor influência no objetivo t1 para as duas cidades. Destaca-se o parâmetro P11 em relação à maior influência, pelo fato do setpoint da climatização afetar diretamente no acionamento

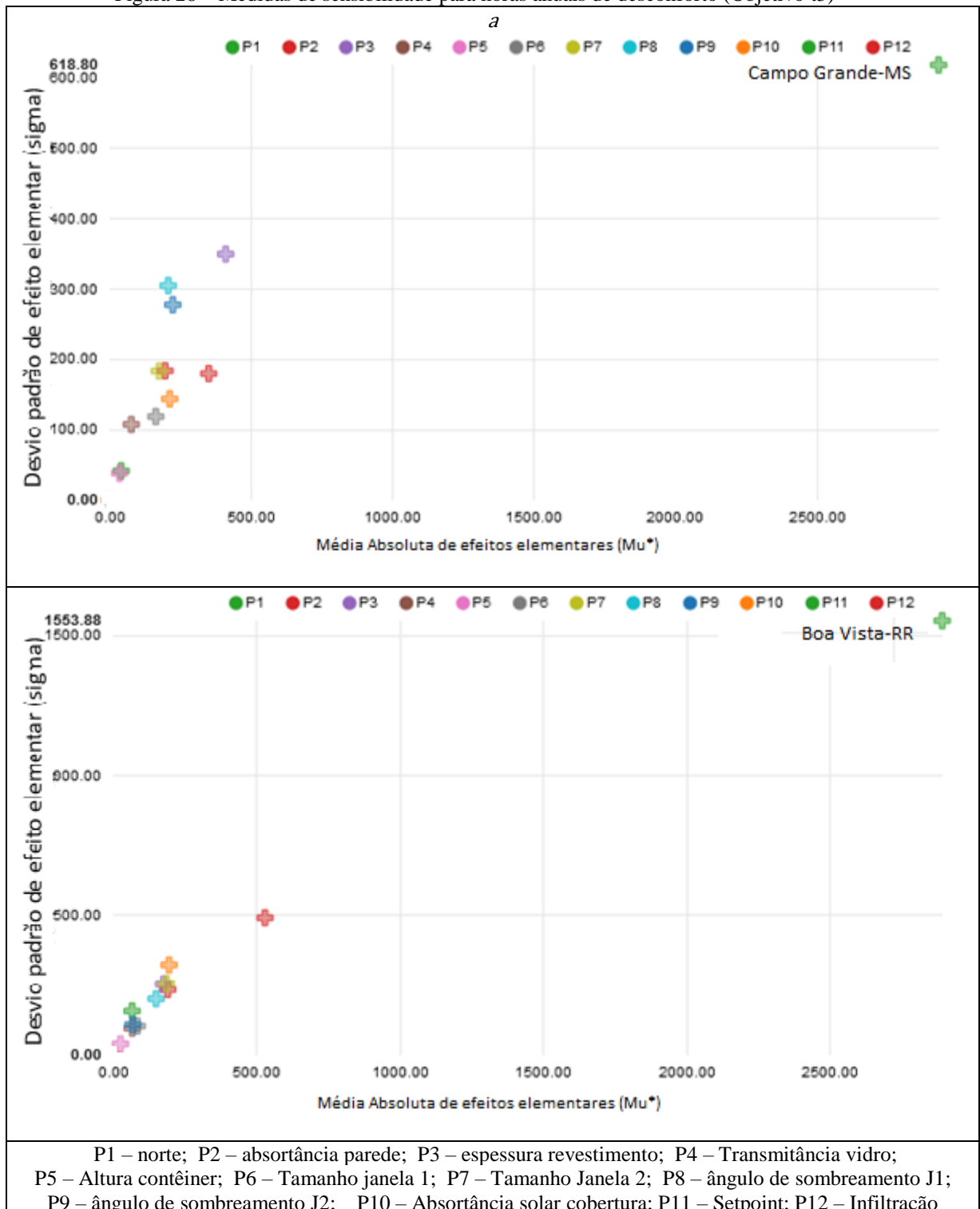
do ar condicionado e consequente consumo de energia. Em relação à não-linearidade, o ângulo de sombreamento da J2 foi o destaque pelo fato da variação do seu efeito principalmente com a variação da orientação do contêiner em relação ao eixo Norte.

Figura 27 – Medidas de sensibilidade para a Percentagem de Desconforto térmico médio anual (Objetivo t2)



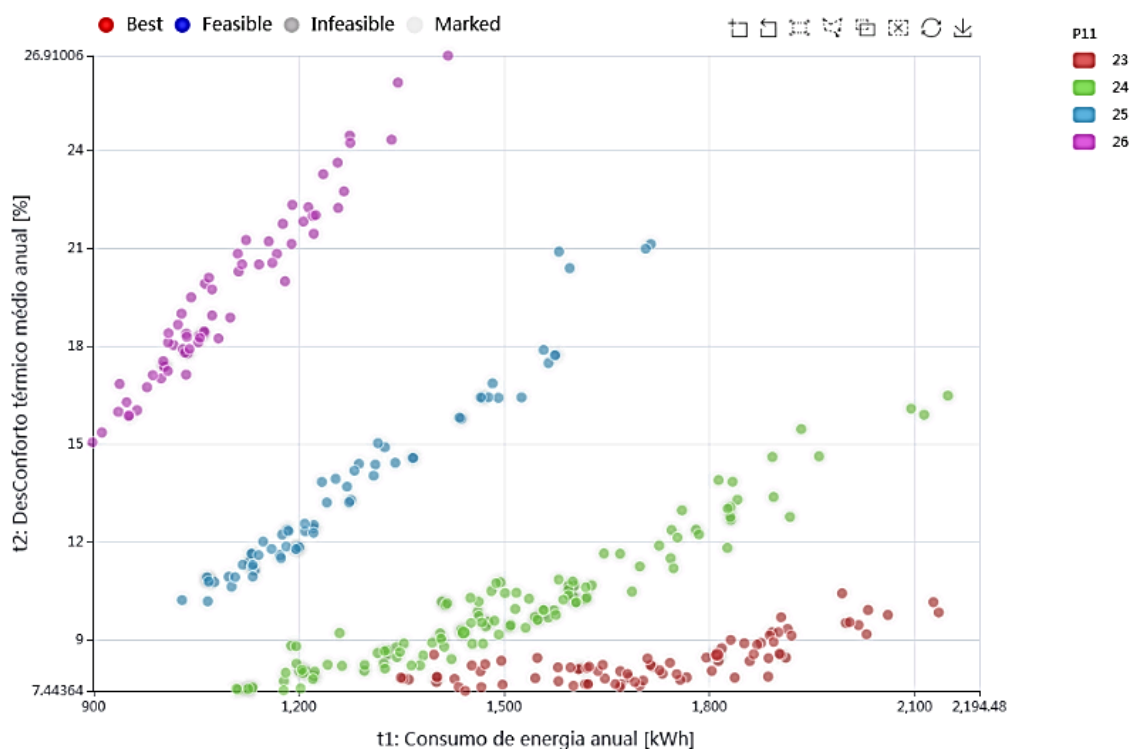
No caso das Figura 27.a e 27.b, os parâmetros P1, P4 e P5 apresentaram menor influência no objetivo t2 para as duas cidades. Destaca-se também o parâmetro P11 em relação à maior influência no Percentual de Pessoas em Desconforto. Em relação ao comportamento não-linear do P11, para o PPD, justifica-se pois foram utilizadas temperaturas entre 23 °C e 26 °C.

Figura 28 – Medidas de sensibilidade para horas anuais de desconforto (Objetivo t3)



No caso das Figura 28.a e 28.b, os parâmetros P1, P4 e P5 apresentaram menor influência no objetivo t2 para as duas cidades. Destaca-se também o parâmetro P11 em relação à maior influência na quantidade de horas de desconforto térmico. Em relação ao comportamento não-linear do P11, pode-se justificar pois foram utilizadas temperaturas entre 23 °C e 26 °C. Pela Figura 29 pode-se verificar a separação dos dados, por temperaturas de setpoint para climatização (P11). Mesmo se tratando de uma análise qualitativa e não quantitativa, pode-se constatar que as temperaturas de 23 °C e 24 °C tiveram menores valores para o Desconforto térmico (t2) e os resultados para temperatura de 26 °C tiveram menores consumo de energia (t1). Esse resultado demonstra também que todos os resultados com a temperatura de 26 °C de setpoint tiveram PPD > 10% e por isso esta temperatura não será mais analisada. Para verificar o comportamento de temperaturas mais baixas, foram inseridas temperaturas abaixo de 23 °C para analisar o comportamento nos três objetivos em estudo.

Figura 29 – Gráfico de Dispersão com objetivos t1 e t2 com classificação por setpoint (P11) para Campo Grande-MS



Por fim, pode-se constatar que o parâmetro mais significativo, para as duas cidades e para os três objetivos, foi a temperatura de setpoint para ligar o resfriamento (P11). Outros que tiveram destaque são: a espessura do revestimento (P3), o sombreamento de janela (P9) e a taxa de infiltração de ar (P12).

A direção do contêiner em relação ao eixo N (P1), a Transmitância térmica dos vidros das janelas (P4) e a Altura dos contêineres (P5), com os dados utilizados, são os dados que menos influenciam (menores médias) os objetivos nas duas cidades e por isso serão desconsiderados na próxima fase (otimização).

4.3. Otimização por NSGA II

Após a Análise de Sensibilidade apresentada, alguns parâmetros foram retirados (P1, P4 e P5) conforme apresentado anteriormente, segue-se os resultados da otimização.

Para a cidade de Campo Grande-MS, foram 80 iterações e 1091 soluções e para a cidade de Boa Vista-RR foram 60 iterações e 907 soluções. Destas, 193 e 163 foram consideradas ótimas, respectivamente.

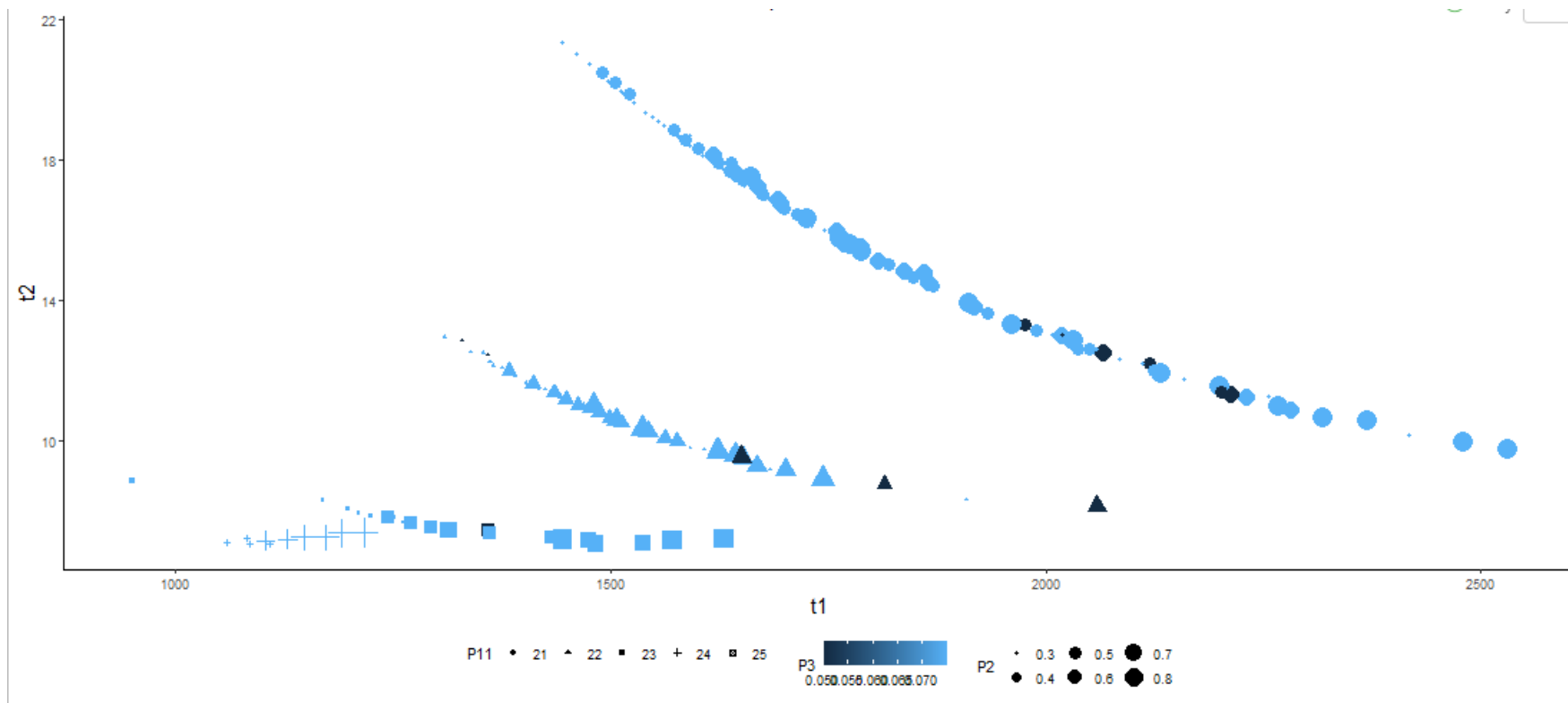
Para facilitar a interpretação dos vários parâmetros em estudo, foi utilizado o *plug-in* Esquise¹⁷ da biblioteca ggplot2 do RStudio. Foram apresentadas correlações entre os parâmetros, de 3 em 3, sendo: P2, P3 e P11; P6, P9 e P11; P10, P12 e P11, individualmente para cada cidade. O parâmetro P11 foi destacado em todas as correlações pois, pela Análise de Sensibilidade, foi o que apresentou maior influência nos três objetivos em estudo.

Na Figura 30, para cidade de Campo Grande-MS, os menores valores para o objetivo t1 (eixo das abscissas) está nos menores valores de absorvância das paredes (P2). Para o objetivo t2 (eixo das ordenadas), para setpoint (P11) de 21 °C, 22 °C e 23 °C, as menores quantidades de PPD estão nos maiores valores de P2, mas para temperaturas de 24 °C e 25 °C o comportamento é diferente. Para a espessura de revestimento das paredes (P3), que implica diretamente na resistência térmica da parede, em Campo Grande foi praticamente a maior espessura.

Em Boa Vista, para setpoint (P11) menores (20 °C, 21 °C, 22 °C), foram encontradas espessuras variadas de revestimento (P3) conforme se varia os outros parâmetros. Para as maiores temperaturas de setpoint, foram encontradas apenas as maiores espessuras de revestimento. Com relação ao P2, dentre as soluções ótimas so apareceu o menor valor da absorvância das paredes.

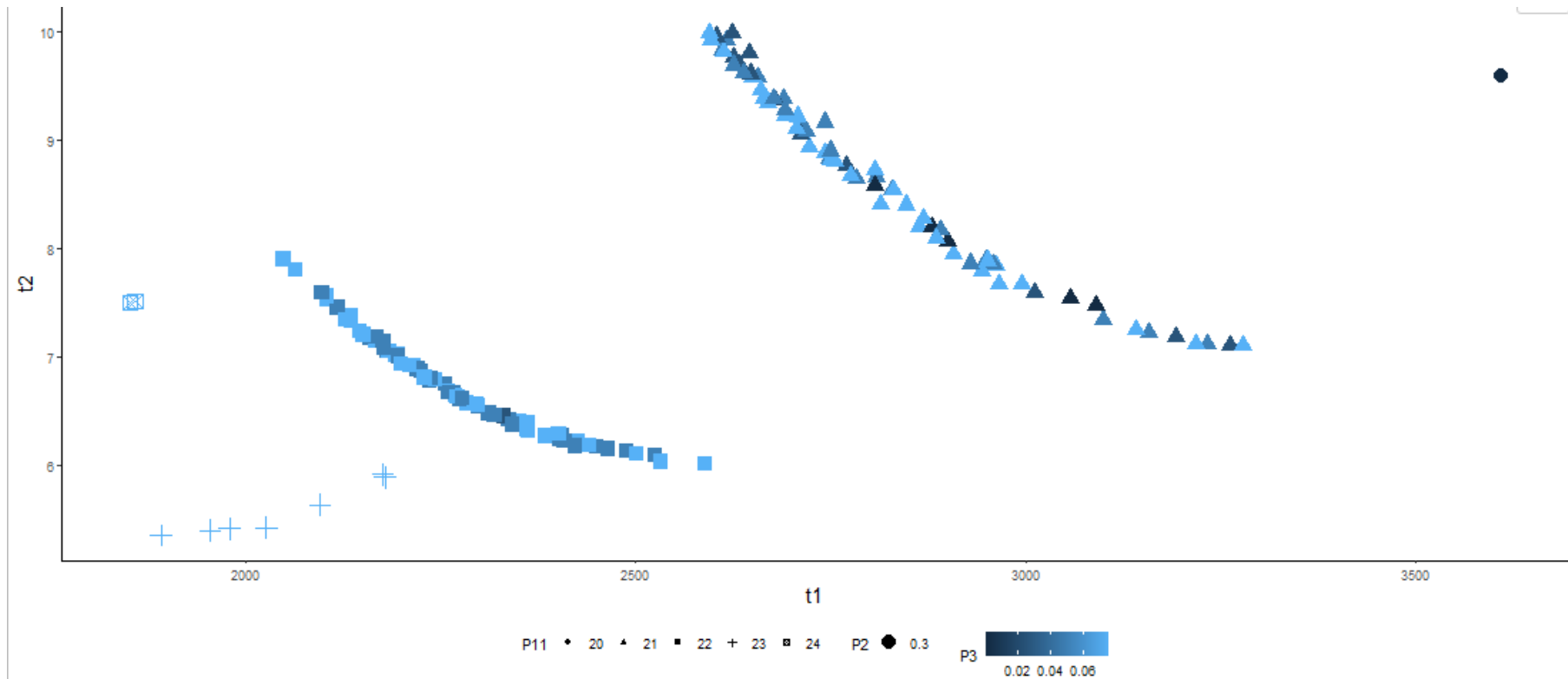
¹⁷ <https://rdocumentation.org/packages/esquise/versions/0.1.2.900>

Figura 30 – Comparação dos objetivos t_1 e t_2 para os parâmetros P_2 , P_3 e P_{11} para Campo Grande-MS



P_2 – absortância parede; P_3 – espessura revestimento; P_{11} – Setpoint; t_1 - minimizar o consumo de energia anual para climatização; t_2 – minimizar o percentual médio anual predito de insatisfeitos termicamente

Figura 31 – Comparação dos objetivos t_1 e t_2 para os parâmetros P_2 , P_3 e P_{11} para Boa Vista-RR



P_2 – absorvência parede; P_3 – espessura revestimento; P_{11} – Setpoint; t_1 - minimizar o consumo de energia anual para climatização; t_2 – minimizar o percentual médio anual predito de insatisfeitos termicamente

Da Figura 32, têm-se que, para cada setpoint (P11), as menores áreas de janela (P6) proporcionam menores valores de consumo de energia (t1). Porém, principalmente para a menor temperatura de setpoint, há um menor percentual de desconforto térmico (t2) para janelas maiores (P6). Para as temperaturas de setpoint maior, somente a menor área de temperatura apareceu como soluções ótimas.

Para o sombreamento (P9), foi verificado que, para maiores temperaturas de setpoint (P11), os menores ângulos de sombreamento apareceram como melhores soluções. Para os menores setpoint (P11) o ângulo de sombreamento é de acordo com o tamanho da janela (P6), sendo que, para maiores áreas de janela se deve usar maiores ângulos de sombreamento (lembrando que o ângulo de sombreamento neste trabalho vai de 90° a 180°). Outro destaque é para o fato de que, se fosse adotado $PPD < 10\%$, não poderia ser utilizado contêiner com área de janela de 4,5 m².

Da Figura 34, os menores valores de absorvância da cobertura (P10) geram menos consumo de energia (t1). Porém, para valores de temperatura de setpoint menores (P11), os maiores valores de absorvância (P10) geraram menores valores de PPD (t2). O mesmo resultado é obtido para as duas cidades. Em relação à vazão de entrada de ar (P12), para ambas as cidades a menor vazão foi considerada ótima

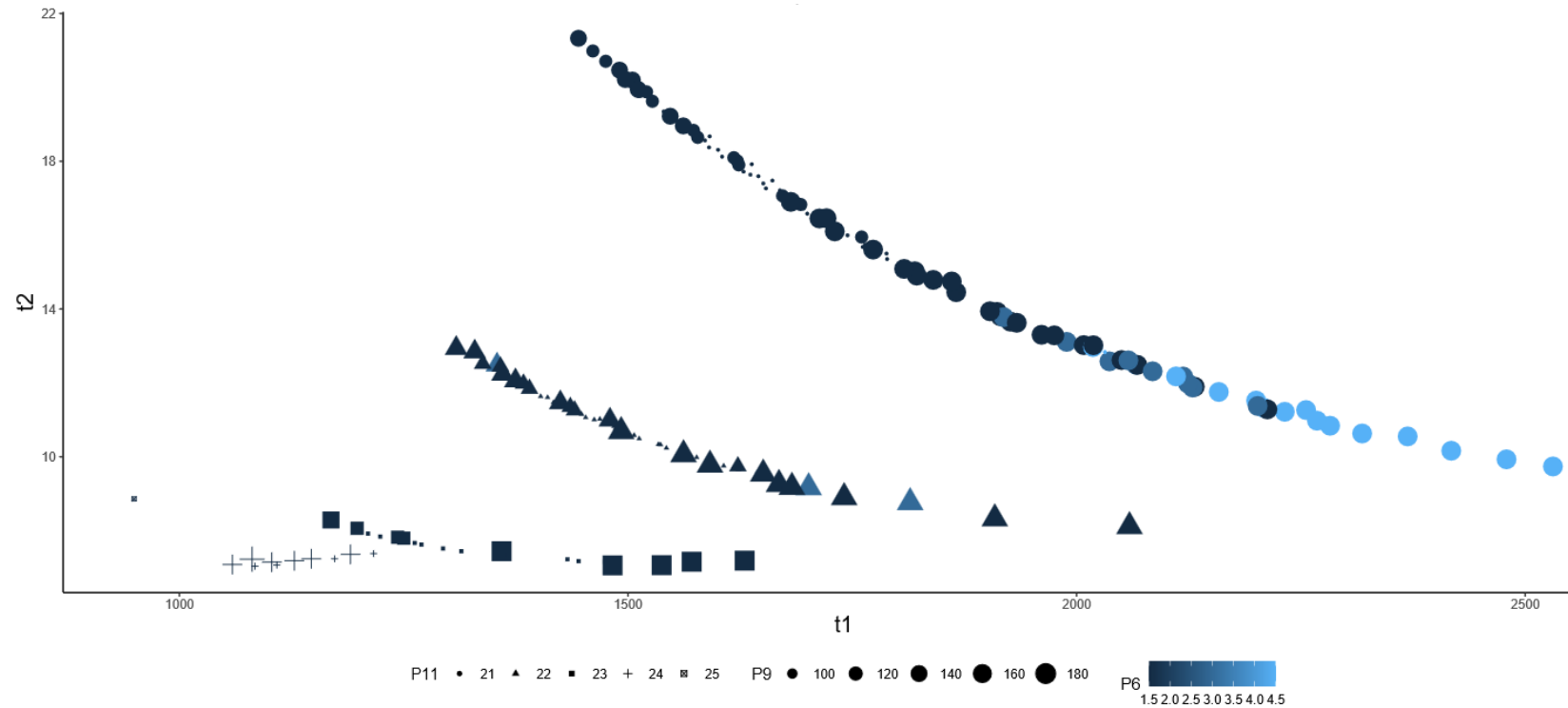
Em ambas as cidades os resultados de cada temperatura de setpoint para climatização (P11) ficaram nitidamente destacados, sendo, qualitativamente, os melhores valores 24 °C para Campo Grande-MS e 23 °C para Boa Vista-RR. Outro fato a ser analisado que em Campo Grande não seria possível utilizar setpoint de 21 °C caso fosse adotado, como restrição no objetivo t2 valores de $PPD < 10\%$.

Analisando graficamente os resultados entre t1 x t3, para o parâmetro P11, conforme feito na Figura 34.b, tem-se, da Figura 36, que, diferente de t2, que a temperaturas 23 °C apresentou menores valores de pessoas com desconforto térmico, as horas de desconforto térmico (t3) seguiram os valores de setpoint, sendo menores quanto menor a temperatura de setpoint.

Outro destaque da análise dos gráficos é que o objetivo t2 não mostra certa linearidade na temperatura de setpoint como pode ser visto com o objetivo t3. Da Figura 37 pode-se notar que os dados com temperatura de setpoint de 23°C apresentam menor PPD médio anual mas ele é intermediário em relação às horas de desconforto anuais.

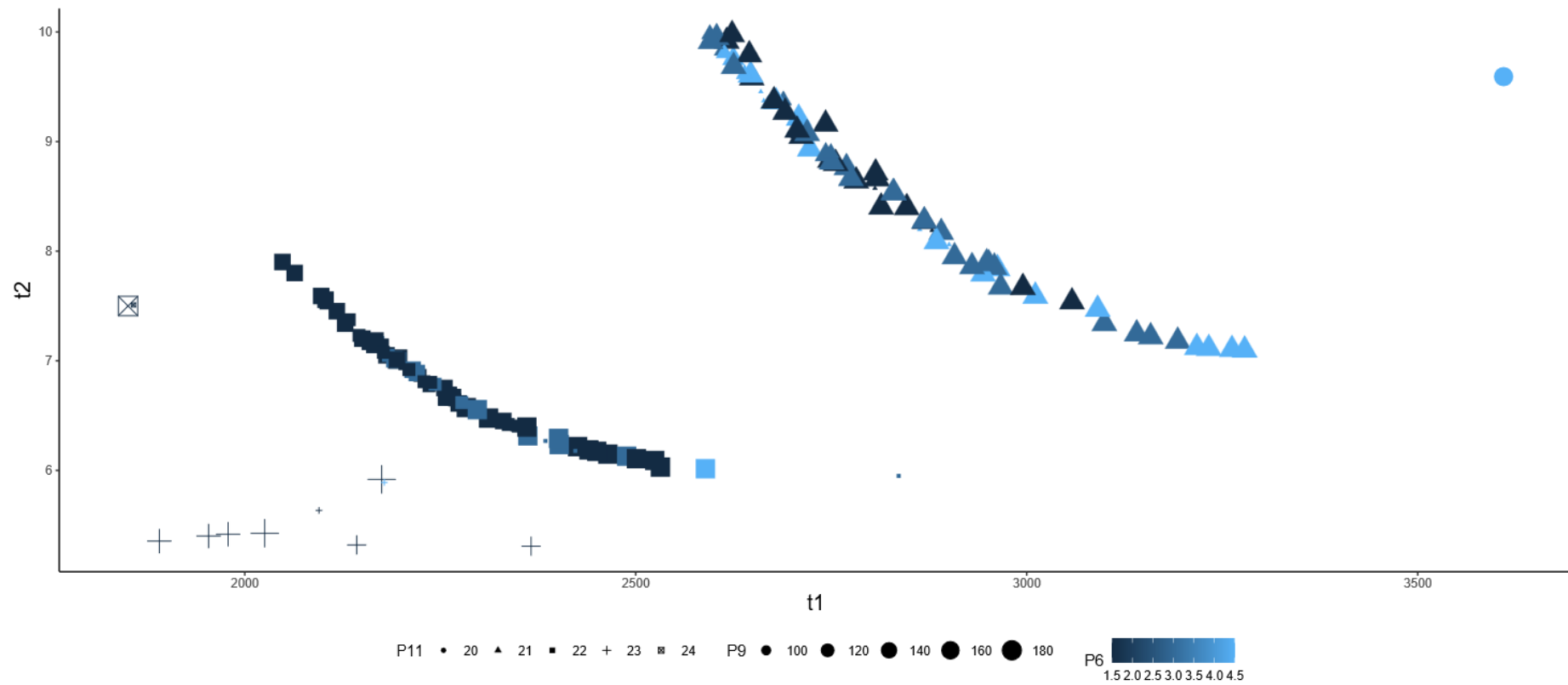
Em relação aos objetivos t2 e t3, que relacionam apenas PPD médio anual e horas de desconforto, para exemplo de Boa Vista, poderia se chegar à conclusão, apenas por análise gráfica da Figura 37, que a melhor temperatura de setpoint (P11) seria 22 °C.

Figura 32 - Comparação dos objetivos t_1 e t_2 para os parâmetros P6, P9 e P11 para Campo Grande – MS



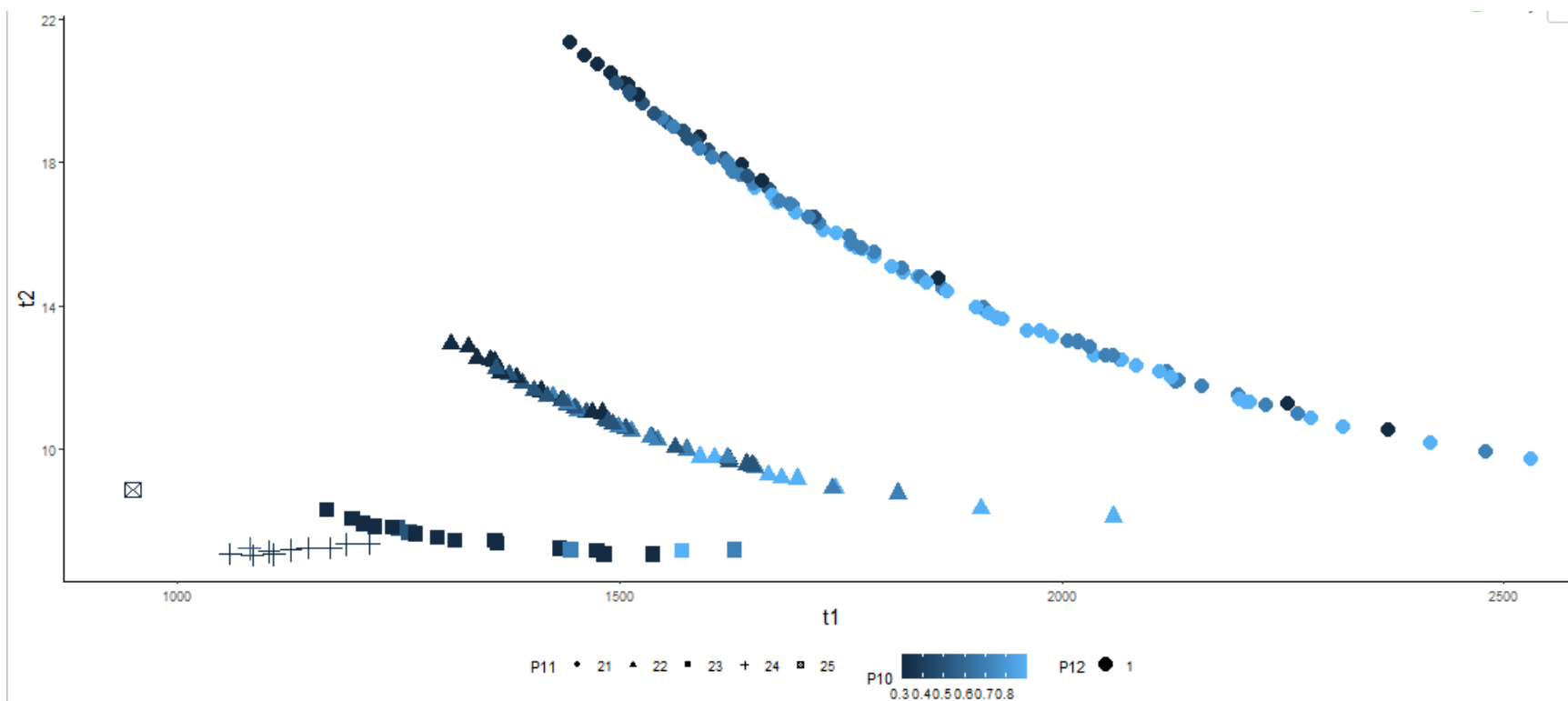
P6 – Tamanho janela 1; P9 – ângulo de sombreamento J2; P11 – Setpoint; t_1 - minimizar o consumo de energia anual para climatização; t_2 – minimizar o percentual médio anual predito de insatisfeitos termicamente

Figura 33 - Comparação dos objetivos t_1 e t_2 para os parâmetros P6, P9 e P11 para Boa Vista - RR



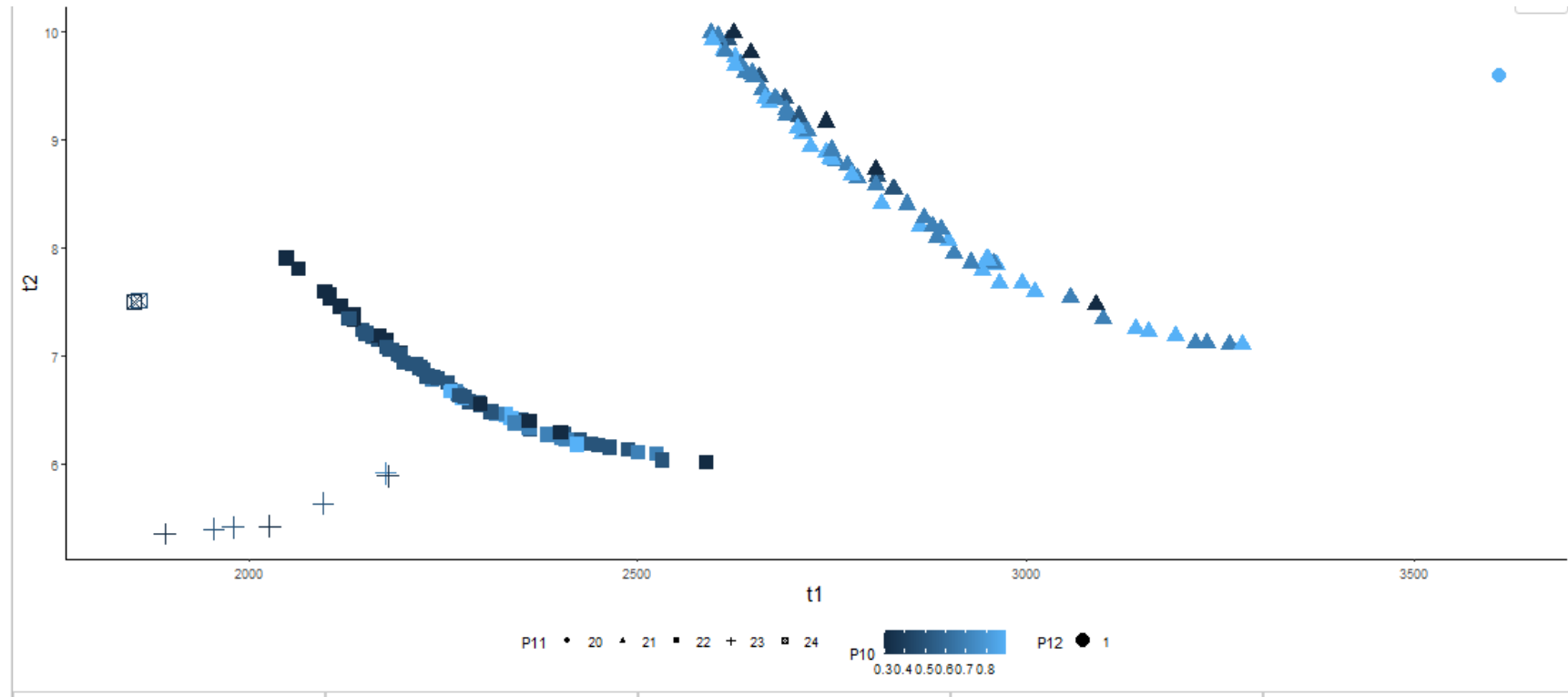
P6 – Tamanho janela 1; P9 – ângulo de sombreamento J2; P11 – Setpoint; t_1 - minimizar o consumo de energia anual para climatização; t_2 – minimizar o percentual médio anual predito de insatisfeitos termicamente

Figura 34 - Comparação dos objetivos t_1 e t_2 para os parâmetros P_{10} , P_{11} e P_{12} para Campo Grande - MS



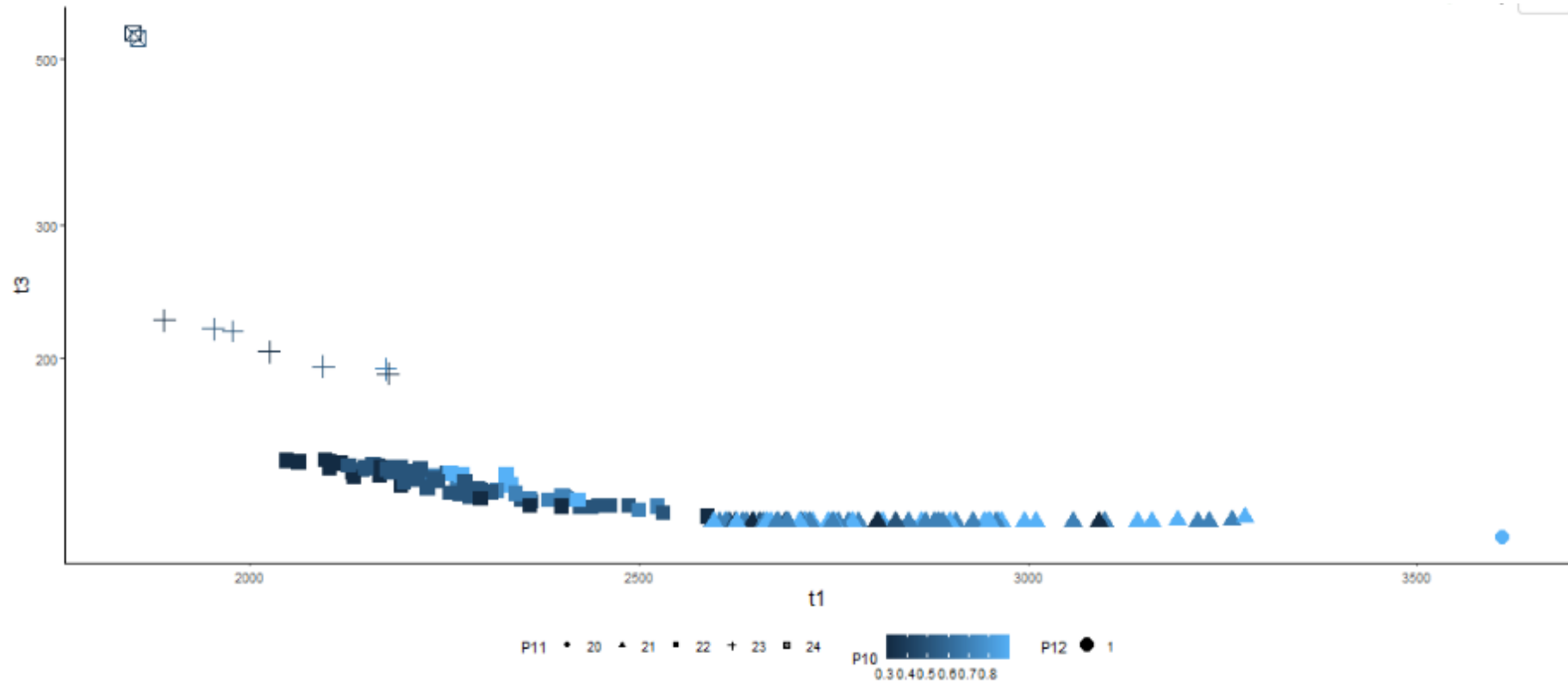
P_{10} - Absortância solar cobertura; P_{11} - Setpoint; P_{12} - Infiltração; t_1 - minimizar o consumo de energia anual para climatização; t_2 - minimizar o percentual médio anual predito de insatisfeitos termicamente

Figura 35 - Comparação dos objetivos t_1 e t_2 para os parâmetros P_{10} , P_{11} e P_{12} para Boa Vista - RR



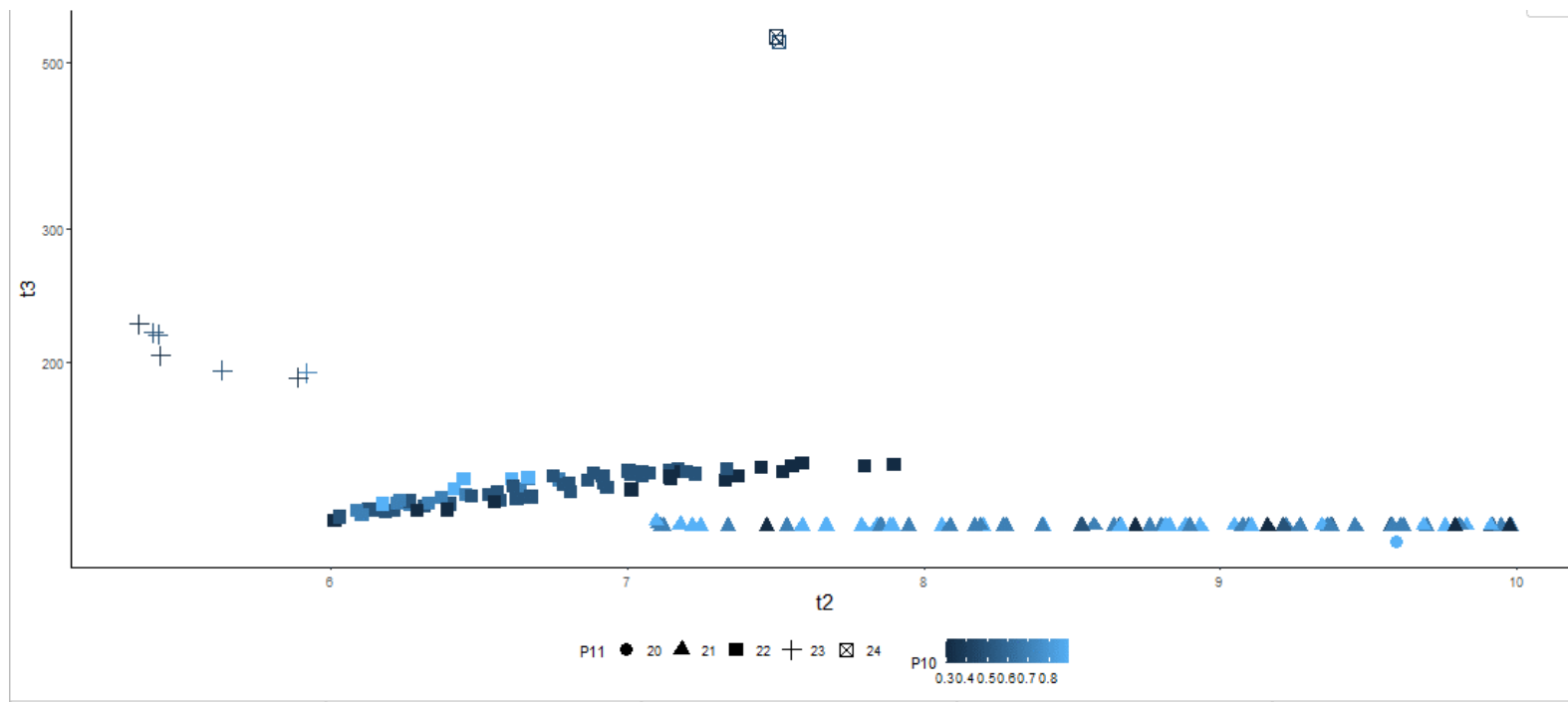
P_{10} – Absortância solar cobertura; P_{11} – Setpoint; P_{12} – Infiltração; t_1 - minimizar o consumo de energia anual para climatização; t_2 – minimizar o percentual médio anual predito de insatisfeitos termicamente

Figura 36 - Comparação dos objetivos $t1$ e $t3$ para os parâmetros $P10$, $P11$ e $P12$ para Boa Vista



P10 – Absortância solar cobertura; P11 – Setpoint; P12 – Infiltração; $t1$ - minimizar o consumo de energia anual para climatização; $t3$ - minimizar a quantidade de horas em desconforto térmico por ano

Figura 37 - Comparação dos objetivos t_2 e t_3 para os parâmetros P10 e P11 para Boa Vista-RR



P10 – Absortância solar cobertura; P11 – Temperatura de Setpoint; t_2 – minimizar o percentual médio anual predito de insatisfeitos termicamente t_3 - minimizar a quantidade de horas em desconforto térmico por ano

Em complemento às análises gráficas já apresentadas, JEA Web API ainda elabora as coordenadas paralelas. As Figura 38 e Figura 39 demonstra os parâmetros encontrados para, respectivamente, os melhores resultados para os objetivos t1, t2 e t3 de Campo Grande-MS e para Boa Vista - RR.

Figura 38 – Gráfico de coordenadas paralelas para Campo Grande, respectivamente, para o menor valor no objetivo t1, t2 e t3

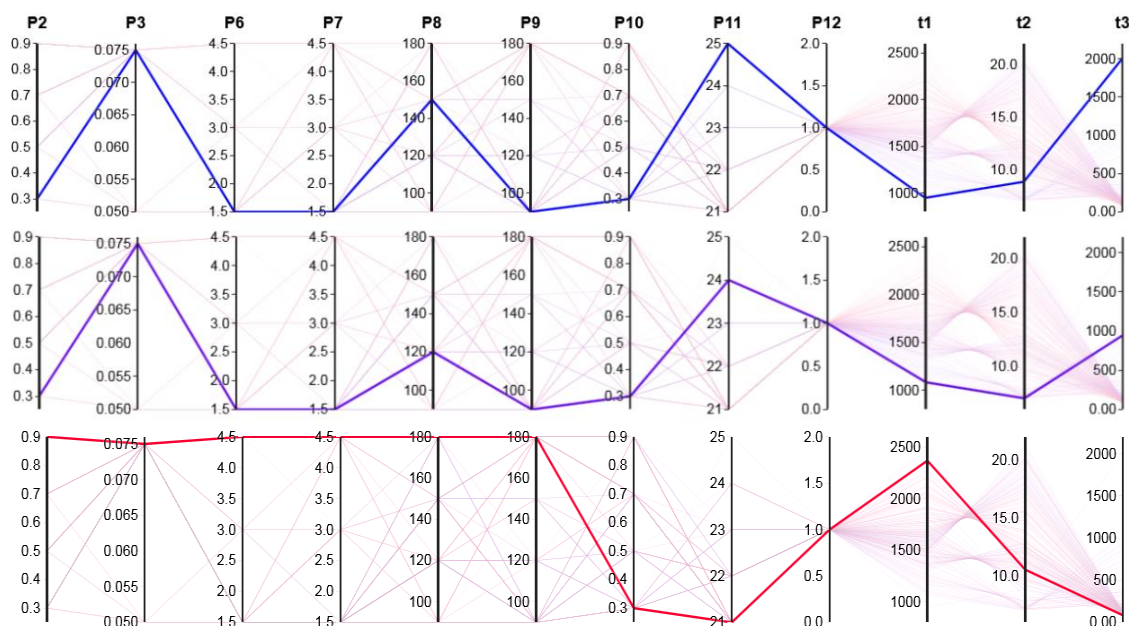
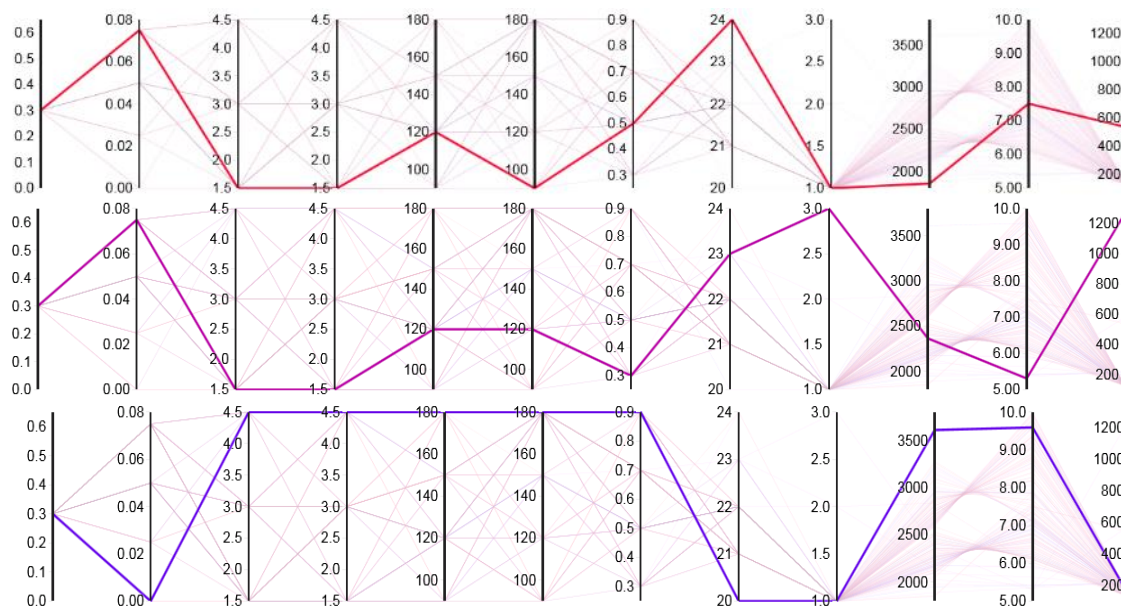


Figura 39 - Gráfico de coordenadas paralelas para Boa Vista, respectivamente para o menor valor no objetivo t1, t2 e t3



P2 – absorvância da parede [-]; P3 – espessura de revestimento [m]; P6 – Tamanho da janela J1 [m]; P7 – Tamanho da janela J2 [m]; P8 – ângulo de sombreamento na J1 [°]; P9 – ângulo de sombreamento na J2 [°]; P10 – Absorvância solar da cobertura [-]; P11 – Setpoint de climatização [°C]; P12 – Vazão de Infiltração de ar no contêiner [-]; t1 – consumo de energia anual para climatização [kWh/ano]; t2 – percentual médio anual

predito de insatisfeitos termicamente [%]; e t3 - minimizar a quantidade de horas em desconforto térmico por ano [h/ano]

Comparando as duas cidades, dentro do espectro analisado na otimização, para o objetivo t1, houve diferença nos parâmetros P8 e P10. Em relação ao P11, pode-se considerar que para as duas cidades as menores temperatura de setpoint são as consomem menos energia para climatização.

Para o objetivo t2, os parâmetros que apresentaram diferença entre as duas cidades, foram o P9 e o P12. Para os menores t3, apresenta os parâmetros para Campo Grande – MS e Boa Vista - RR, respectivamente. Neste caso, os parâmetros que apresentaram diferença foram o P2, P3 e P10.

Fazendo a análise por cidade, em Campo Grande, os gráficos de menores t1 e t2 apresentam-se valores de parâmetros mais próximos. Foram apresentados como melhores opções o menor P2, maior P3, menor P6 e P7, P8 variou, menores P9 e P10, P11 variou (sendo 25 °C a temperatura que consome menor energia e 24 °C a temperatura com menor PPD) e menor P12. Em relação à minimizar as horas de desconforto térmico (t3), os melhores parâmetros foram os maiores P2, P3, P6, P7, P8, P9 e menores P10, P11 e P12. Além disso, o menor t3 obteve um alto consumo de energia e um PPD aproximadamente 10%.

Em Boa Vista, os gráficos de menores t1 e t2 apresentam-se valores de parâmetros mais próximos. Foram apresentados como melhores opções o menor P2, maior P3, menor P6 e P7, foram encontrados valores intermediários para sombreamento das janelas (P8 e P9), P10, P11 variou (sendo 24 °C a temperatura que consome menos energia e 23 °C a temperatura com menor PPD) e P12 variou (sendo menor valor para o t1 e alto valor para t2). Em relação a minimizar as horas de desconforto térmico (t3), os melhores parâmetros foram os maiores P6, P7, P8, P9, P10 e menores P2, P3, P11 e P12. Além disso, o menor t3 obteve um alto consumo de energia e um PPD de aproximadamente 10%.

No JEA Web API há também há possibilidade de exportar tabelas com valores dos parâmetros e objetivos, que podem ser ordenados. A Figura 40 apresenta um pequeno extrato da aba “Overview”, que pode ser exportada, tanto os valores analisados quando os valores “ótimos”. Esses valores podem ser ordenados por parâmetro (P) ou objetivo (t) ou fazer ponderações para se escolher a melhor solução “ponderada”, usando um programa que consiga ler arquivos com extensão .csv ou .xls.

Figura 40 – Imagem ilustrativa da web que pode ser exportada em formato de planilha

P2	P3	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	T1	T2	T3
0.3	0.075	1.5	1.5	150	90	0.3	25	1	949.49	8.858	2,008.67
0.3	0.075	1.5	4.5	120	150	0.3	25	1	982.66	9.681	2,257.33
0.3	0.075	1.5	1.5	150	150	0.7	25	1	1,005.670	9.817	2,237.83
0.3	0.075	1.5	1.5	150	120	0.3	25	3	1,016.88	9.540	2,152.5
0.3	0.075	4.5	1.5	150	150	0.5	25	1	1,018.5	10.205	2,359.33
.
.
.

No caso deste trabalho, não foi feita nenhuma combinação de tais objetivos para chegar em um valor ótimo pois acredita-se que para cada caso deverá ser levado um peso. A exemplo, como peso para o fator consumo de energia, poderia ser levado em conta o valor da energia para um PPD máximo de 10 %.

Com relação à variação entre valores mínimos e máximos dos objetivos, têm-se os resultados conforme a Tabela 15. Pela Tabela 15, constata-se que, a depender dos parâmetros, o contêiner pode variar bastante os valores dos objetivos.

Tabela 15 – Valores máximos e mínimos por objetivos e por cidade

Objetivo	Campo Grande-MS:		Boa Vista-RR	
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo
t1 (kWh/ano)	949,49	2855,29	1850,74	4233,2
t2 (%)	7,03	29,67	5,3	22,35
t3 (h/ano)	84,17	3205	114,67	3463,33

Um fato que se deve destacar é que nem sempre será as mesmas configurações analisadas em duas cidades distintas, no caso do método de otimização, pois o método não abordar todas as possibilidades. Como exemplo, o caso com menor objetivo t1 para Campo Grande – MS (P2 = 0,3; P3 = 0,075; P6 = 1,5; P7 = 1,5; P8 = 150; P9 = 90; 0,3; P10 = 0,3; P11 = 25 e P12 = 1) não foi analisado dentre 907 analisadas na cidade de Boa Vista – RR.

Ressalta-se que isso não significa que a melhor opção para t1 em Campo Grande-MS não possa ser a melhor opção em Boa Vista, ou outra cidade qualquer, apenas que ela não foi apontada, pelo processo de otimização, para Boa Vista.

5. CONCLUSÃO

O Exército Brasileiro tem utilizado contêineres, como edificação, para diversas finalidades: hospitais de campanha, alojamento, escritórios de engenharia em canteiro de obra. Porém, conforme alguns editais encontrados, não é dada importância às especificações técnicas necessárias, principalmente com relação à envoltória destes equipamentos.

A presente pesquisa buscou encontrar os principais parâmetros (Orientação ao eixo Norte; Absortância solar nas paredes; Espessura revestimento de parede; Transmitância solar dos vidros nas janelas; Alturas de contêiner; Tamanhos de janelas; Ângulos de sombreamento nas janelas; Absortância solar na cobertura; Setpoint para acionamento do ar condicionado; Taxa de infiltração de ar e Contato com o solo), em duas cidades de zonas bioclimáticas diferentes, com objetivos de se minimizar o consumo de energia para climatização garantido desempenho térmico aos usuários, com softwares gratuitos, com o intuito de se obter conhecimento técnico suficiente para a equipe técnica do Exército Brasileiro pode exigir quando for utilizar este tipo de equipamento em outras cidades / zonas bioclimáticas.

Como resultados, foram apontados alguns parâmetros que não são significativos quando se está analisando contêiner climatizado e foram descartados. Destaca-se aqui que a significância de parâmetros depende da localidade e dos objetivos.

Outro ponto que merece destaque foi a diferença dos impactos quando se análise situações pontuais individualmente e quando se tem uma análise múltipla. Como exemplo, analisando apenas o impacto de se utilizar ou não duas janelas. Neste caso houve um aumento o consumo de energia em 7% e aumentar o desconforto térmico das pessoas em 12%. Quando se análise conjuntamente os nove parâmetros, os valores podem chegar a uma diferença de aproximadamente 200%.

Por fim, pode-se mostrar neste trabalho que as mudanças nos parâmetros podem impactar bastante no valor do consumo de energia e no desempenho térmico da edificação e que as ferramentas Energyplus, jEPlus+EA e JEA são simples, mas de grande impacto na solução de problemas de análise e otimização de energia em edificações.

5.1. Limitações do trabalho

- a. O computador pessoal não tem o mesmo desempenho de um computador de pesquisa e por isso os parâmetros de otimização foram reduzidos e também o número de cidades de diferentes Zonas Bioclimáticas.
- b. Não se pode fazer medições nos contêineres em Boa Vista RR devido ao isolamento social provocado pela COVID.

5.2. Trabalhos futuros

- a. Teste de novas formas, através de acoplamento de contêineres por exemplo;
- b. Inclusão de custos para melhorar a escolha da melhor opção pelo caráter financeiro;
- c. Emprego de diferentes isolantes térmicos;
- d. Incluir medição de variáveis ambientais *in loco*;
- e. Análise de outros critérios, tais como qualidade do ar e iluminação natural;
- f. Incluir análise de ventilação mista.

5.3. Recomendações para órgãos públicos

- a. Em licitação para aquisição ou locação, deverá exigir Acervo Técnico-Operacional das empresas participantes. Com isso, a equipe técnica deverá verificar os padrões de acabamento da empresa com menor preço, através de visita aos locais apresentados no Acervo Técnico-Operacional, antes de homologar a licitação, principalmente nos locais de cortes das chapas para inclusão de esquadrias;
- b. O edital deverá exigir padrão de vedação dos contêineres, principalmente com relação às taxas de renovação de ar e incluir que a empresa comprove, tecnicamente, após a colocação das esquadrias e isolamentos, sobre pena de reprovação e penalização por atraso na entrega. Recomenda-se que seja feito o teste no local de utilização para verificar se o transporte não afetou os encaixes dos painéis.
- c. Exigir projeto de isolamento térmico e eficiência energética para a localidade específica de uso do contêiner, de acordo com a localidade de emprego do mesmo. Tal medida se faz necessária pelo fato da discrepância de valores encontrados entre os objetivos e as cidades.

- d. Nos casos de superfície externa em chapas metálicas de qualquer natureza, a superfície externa deve apresentar valor de emitância térmica superior a 0,7 para as ZBs 3 a 8, por meio de laudo técnico padronizado na tabela 1 da ABNT NBR 15.575-1:2021.
- e. Atender para especificação dos equipamentos mecânicos de climatização.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABULNOUR, A. H. The post-disaster temporary dwelling: Fundamentals of provision, design and construction. **HBRC Journal**, v.10, p. 10 – 24. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.06.001>
- ALVES, J. V. P.; FERREIRA, R. S.; CAVALCANTE, R. P. Containers – uma nova alternativa para a construção civil. Estudo direcionado para projetos residenciais. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 1, n. 46, p. 19, 2019.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS **ASHRAE 55**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, 2017.
- ARENHARDT, Nilmar Luís; WANDER, Paulo Roberto. Um panorama sobre os estudos relacionados ao conforto térmico em salas de aula. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 3, p. 901–919, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.220-1** – Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. ABNT, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.220-2** – Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. ABNT, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.220-3** – Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. ABNT, 2005c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.575-1** – Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.575-1** – Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16.401-1** – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos de Instalações. ABNT, 2008a.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16.401-3** – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior. ABNT, 2008b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6.346** – Contêineres de carga - Códigos, identificação e marcação. ABNT, 2002.
- ATMACA, Nihat. Life-cycle assessment of post-disaster temporary housing. **Building Research and Information**, v. 45, n. 5, p. 524–538, 2017.
- AWANG, A. H.; DENAN, Z.; HANITA, N.; *et al.* Office Interior: The Influence of Office Environmental Factors towards Task Performance. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, p. 116–119, 2018.
- BINGHAM, R. D.; AGELIN-CHAAB, M.; ROSEN, M. A. Whole building optimization of a residential home with PV and battery storage in The Bahamas. **Renewable Energy**, v. 132, p. 1088–1103, 2019.
- BRASIL. **Decreto-lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943**. Aprova a Consolidação das Leis do Trabalho
- BRASIL. **Lei 8666, de 21 de junho de 1993**. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/18666cons.htm. Acesso em: 27 Set 2021.
- BRASIL. **Lei Complementar 97, de 9 de junho de 1999**. Dispõe sobre as normas gerais para a organização, o preparo e o emprego das Forças Armadas. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp97.htm. Acesso em: 10 dez 2020.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Resolução-RE Nº 09**, de 16 de janeiro de 2003 – Dispõe Padrões Referencias de Qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Brasília, DF. Disponível em: http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RE_09_2003_.pdf/8ccafc91-1437-4695-8e3a-2a97deca4e10. Acesso em:
- BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Instrução Normativa nº 01** - Dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, de 19 jan 2010. Brasília, DF. Disponível em:

<https://portal.tcu.gov.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A81881F7595543501762A30FA9A2BA7>. Acesso em: 10 dez 2020. BRASIL, 2010a

BRASIL. **Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 17 Ago 2022. BRASIL, 2010b

BRASIL. **Lei 13.589, de 4 de janeiro de 2018**. Dispõe sobre sobre a manutenção de instalações e equipamentos de sistemas de climatização de ambientes. Brasília, DF. Disponível em: <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/533981554/lei-13589-18>. Acesso em: 27 Set 2021.a

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Reguladora 17** – Ergonomia, atualizada pela Portaria MTb nº 876, de 24 de outubro de 2018. Brasília, DF.b

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Reguladora 15** – Atividades e Operações Insalubres, de 09 dez 2019. Brasília, DF. Disponível em: <https://sit.trabalho.gov.br/portal/index.php/ctpp-nrs/nr-15?view=default>. Acesso em: 10 dez 2020.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria nº 42, de 24 de fevereiro de 2021. **Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**. Diário Oficial de União. Publicado em: 09/03/2021 / Edição: 45 / Seção: 1 / Página: 44. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-42-de-24-de-fevereiro-de-2021-307486285> . Acesso em: 25 Mar. 2021.

BRE, F.; SILVA, A. S.; GHISI, E.; et al. Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 853–866, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.025>>.

BUGES, N. L.; STUMPO, L. F. A.; PORTO, F. H. F. dos S.; *et al.* A eficiência energética de contêiner adaptado como residência nos diversos climas do Brasil. **XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 1, n. September, p. 183–192, 2014.

CARBONARI, Luana Toralles. **Reutilização de contêineres ISO na arquitetura: aspectos projetuais, construtivos e normativos do desempenho térmico em edificações no**

- sul do Brasil**. 2015. 196 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015.
- CARBONARI, Luana Toralles; BARTH, Fernando. Reutilização de contêineres padrão ISO na construção de edifícios comerciais no sul do Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 6, n. 4, p. 255, 2016.
- CBIC, Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Os resíduos da construção civil**. Brasília, 2014. Disponível em: <<https://cbic.org.br/os-residuos-da-construcao-civil/>> Acesso em: 17 jun 2022.
- CBIC, Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Energia nas construções: uma contribuição do setor à redução de emissões e de uso de fontes renováveis de energia**. Brasília, 2017. Disponível em: < https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2017/11/Energia_na_Construcao_2017-1.pdf> Acesso em: 17 out 2021.
- CHEN, X., YANG, H., SUN, K., A holistic passive design approach to optimize indoor environmental quality of a typical residential building in Hong Kong, **Energy**, v. 113, p. 267-281, 2016.
- DARA, C.; HACHEM-VERMETTE, C.; ASSEFA, G. Life cycle assessment and life cycle costing of container-based single-family housing in Canada: A case study. **Building and Environment**, v. 163, n. July, p. 106332, 2019.
- DE DEAR, R. J; BRAGER, G. S. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55**. *Energy and Buildings*, v. 34(6), 549–561, 2002
- DE DEAR, R.; XIONG, J.; KIM, J.; et al. A review of adaptive thermal comfort research since 1998. **Energy and Buildings**, v. 214, p. 109893, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>>.
- DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.
- DEUS, Edmilson Magalhães de; SILVA, Arthur Santos. Análise de Otimização Multiobjetivo da Envoltória de um Contêiner Adaptado para uso Militar em Campo Grande-MS. **XVI Encontro Nacional De Conforto No Ambiente Construído**. Palmas-TO 2021

- ELRAYIES, Ghada Mohammad. Thermal Performance Assessment of Shipping Container Architecture in Hot and Humid Climates. **ADVANCED ENGINEERING MATERIALS**, v. 7, n. 4, 2017.
- ENERGYPLUS. **Engineering Reference Manual**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; 2014.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Atlas da Eficiência Energética Brasil / 2020 – Relatório de Indicadores**. EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-556/Atlas%20consolidado_08_03_2021.pdf. Acessado em 17 out 2021.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.
- EVINS, R. A review of computational optimization methods applied to sustainable building design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 230–245, 2013.
- FANGER, P. O. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970, pp. 244.
- FERREIRA, Ricardo Jorge da Silva. **Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Cálculo das Coberturas Jardim**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Construções) Universidade do Porto, 2013
- FONSECA, L. P. G.; NUNES, V. D. L.; SANTANA, L. O.; et al. Otimização multiobjetivo das dimensões dos ambientes de uma residência unifamiliar baseada em simulação energética e estrutural. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 267–288, 2017.
- GAMARRA, Melanie Gissel Urdangarin. **Projeto de Casa Rural em Contêineres Energia Zero por meio de Otimização Numérica para diferentes climas Do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020.
- GIRIUNAS, Kevin; SEZEN, Halil; DUPAIX, Rebecca B. Evaluation, modeling, and analysis of shipping container building structures. **Engineering Structures**, v. 43, p. 48–57, 2012.
- GOMES, C. P.; LEITE, G. U.; SENA, R. W. R.; *et al.* Impacto Ambiental e Gerenciamento de Resíduos Sólidos Advindos da Construção Civil no Brasil: Uma Revisão de Literatura / Environmental Impact and Solid Waste Management Arising from Civil

Construction in Brazil: A Literature Review. **ID on line REVISTA DE PSICOLOGIA**, v. 15, n. 55, p. 729–742, 2021.

GUEDES, Rita; BUORO, Anarrita Bueno. Reuso de containers marítimos na construção civil. **Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística**, v. 5, n. 3, p. 101–118, 2015. Disponível em: < https://www.sp.senac.br/blogs/revistainiciacao/wp-content/uploads/2015/12/RevistaIC_Sustentabilidade_5n3.pdf >. Acesso em: 12 JAN 2022.

HAMDY, Mohamed; SIRÉN, Kai. A multi-aid optimization scheme for large-scale investigation of cost-optimality and energy performance of buildings, **Journal of Building Performance Simulation**, 9:4, 411-430, 2016. DOI: 10.1080/19401493.2015.1069398.

HONG, Yan. A study on the condition of temporary housing following disasters: Focus on container housing. **Frontiers of Architectural Research**, v. 6, n. 3, p. 374-383. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317693593_A_study_on_the_condition_of_temporary_housing_followin_g_disasters_Focus_on_container_housing Acesso em: 15 jan. 2019.

ISLAM, H.; ZHANG, G.; SETUNGE, S.; *et al.* Life cycle assessment of shipping container home: A sustainable construction. **Energy & Buildings**, v. 128, p. 673–685, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 668** – Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings. ISO, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730** – Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. ISO, 2005.

JE Plus, 2017. **JE Plus website**. Disponível em: <http://www.jeplus.org/wiki/doku.php>. Acessado em 24 out 2021.

JÚNIOR, Adelmo Benevides de Santana. **Implantação e Avaliação De Sistemas Fotovoltaicos junto ao Comando Militar do Oeste**. FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2019.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos INMETRO 2018**, 2018. Disponível em:

<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 14 Mar 2021.

- LAMBERTS, R.; DUTRA, L; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Eletrobras, Procel, MME, 2014.
- LINCZUK, Vinícius Cesar Cadena. **Otimização Multiobjetivo do Projeto de Edificações Residenciais para Obtenção de Baixo Consumo Energético na Região Sul do Brasil**. Tese (Doutorado em Ciências em Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- LINCZUK, V. C. C.; BASTOS, L. E. G. Otimização multiobjetivo orientada ao desempenho térmico para o projeto de edificações de baixo consumo de energia na Região Sul do Brasil. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 509–529, 2020.
- MARQUES, T. T.; REGOLÃO, R.; CHVATAL, K. Aplicação de ferramentas simplificadas de projeto voltadas ao desempenho térmico em uma habitação de interesse social. In: 2º Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído. **Anais SBQP 2011**, 03 e 04 de novembro de 2011, Rio de Janeiro, p. 120–130, 2011.
- MAURO, G.M.; HAMDY, M.; VANOLI, G.P.; BIANCO, N.; HENSEN, J.L. A new methodology for investigating the cost- optimality of energy retrofitting a building category. **Energy and Buildings**, n. 107, p. 456-478, 2015.
- MCCONNELL, C.; BERTOLIN, C. Quantifying Environmental Impacts of Temporary Housing at the Urban Scale: Intersection of Vulnerability and Post-Hurricane Relief in New Orleans. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 10, n. 4, p. 478–492, 2019.
- MEDEIROS, M. M. X. de L.; SOUSA, L. L. de L.; **Análise do uso de softwares de Simulação Termoenergéticas em Edificações**. Universidade Federal Rural do Semiárido, 2019.
- MELO, Thiago da Costa Melo. **Eficiência Energética e Conforto Térmico em Edificações em Recife utilizando o Energyplus**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, 2018.
- MESCOLOTTO, Eurides Luiz. A Eficiência e o Futuro. **Casa Eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termo Energético**. Florianópolis: UFSC, 2010.
- MUSSNICH, L. B. Retrofit em containers marítimos para reuso na arquitetura e sua viabilidade. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, v. 1, n. 10, p. 1-22, dez.

2015. Disponível em: <https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n10-2015/retrofit-em-containers-maritimos-para-reuso-na-arquitetura-e-sua-viabilidade/>.

Acesso em: 14 Out 2021.

NETO, L. P. S. **Instalações Militares de Energia Zero: avaliação técnica para quartéis do Exército Brasileiro com sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia.** Campo Grande, 2021. 343 p. Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

NGUYEN, A. T.; REITER, S.; RIGO, P.. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. **Applied Energy**, v. 113, p. 1043–1058, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>>.

OLIVEIRA, L. K. dos S.; RÊGO, R. de M.; FRUTUOSO, M. N. M. de A.; *et al.* Simulação Computacional Da Eficiência Energética para uma Arquitetura Sustentável. **Holos**, v. 4, p. 217, 2016.

ORMANDY, D.; EZRATTY, V. Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies. **Energy Policy**, v. 49, p. 116–121, 2012.

PEÑA, J. A.; SCHUZER, K. Design of reusable emergency relief housing units using general-purpose (gp) shipping containers. **International Journal of Engineering Research and Innovation**, v. 4, n. 2, p. 55 – 64. 2012.

PIMENTEL, Breno Pontes. **Etiquetagem energética de edificação do exército brasileiro pela INI-C.** FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL, 2020.

PROJETEEE. **Dados climáticos de Campo Grande, MS.** 2020. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/>>. Acesso em: 2 fev. 2022

RACHID, Marcus do Nascimento. **Implementação da Eficiência Energética em uma Edificação Militar do Exército Brasileiro.** Campo Grande, 2018. Trabalho de Conclusão do Curso de Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

RODRIGUES, Marcus Vinicius de Paiva. **Avaliação da Eficiência Energética de Edificações Residenciais em fase de Projeto: Análise de Desempenho Térmico pelo Método Prescritivo e por Simulação Computacional aplicados a Estudo de Caso de Projeto-Tipo do Exército Brasileiro.** 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, 2015.

- RUPP, R. F.; DE VECCHI, R.; ASMUS, B. F.; CANDIDO, C. M.; GHISI, E. Conforto térmico humano em escritórios com sistema central de condicionamento artificial em clima subtropical úmido: estudos de campo vs. abordagem analítica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 111-123, jan./mar. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.
- RUPP, Ricardo Forgiarini; GHISI, Eneidr. Avaliação de modelos preditivos de conforto térmico em escritórios no clima subtropical brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 91–107, 2019.
- SANTOS, Lara Monalisa Alves dos. Hospital Militar de Campanha: móvel, modular e autônomo. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v. 1, n. 108, 2017. Disponível em: <<https://semanaacademica.com.br/artigo/hospital-militar-de-campanha-movel-modular-e-autonomo>>.
- SANTOS, Tássio Luiz dos. **Proposta de melhoria do método de simulação para a avaliação de desempenho térmico de envoltórias de habitações de interesse social**. Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2019.
- SARTORI, G.; SILVA FILHO, L. C. P. da .; TORRES, M. C. A. Análise do método de avaliação térmica dos projetos de pré-escolas do programa Proinfância. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 12,p. e021020,2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v12i00.8661249>
- SHI, X.; TIAN, Z.; CHEN, W.; SI, B.; JIN, X. A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 65, p. 872-884, 2016.
- SILVA, Arthur Santos. **Desenvolvimento de um método para avaliação do Desempenho Térmico e Energético de Edificações aplicando Análise de Incertezas e Sensibilidade**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- SILVA, Milene de Fátima Costa Gonzaga. **Edificações Construídas a partir de Contêineres Marítimos – Estudos de caso na Região Central de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- SOARES, C. P. S. **Investigação do potencial de economia de energia com o uso de dispositivos de proteção solar no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

- SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; LAMBERTS, R. Sombrear ou não sombrear janelas. **Nota Técnica**, n. 02, p. 4, 2011. Disponível em: <www.labeee.ufsc.br/publicacoes/notas-tecnicas/ 1.>.
- TEIXEIRA, A. C. **Processo de Etiquetagem de Projetos de Obras Militares para Eficiência Energética e Certificação PROCEL utilizando Modelagem da Informação da Construção**. 2018. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- TIAN, Wei. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 411–419, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>>.
- VEIGA, R. K. S. et al. Modelagem da ventilação natural com a aplicação do objeto energy management system do programa EnergyPlus. **XV ENCAC (Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído)/ XI ELACAC (Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído)**, n. October, p. 11, set. 2019.
- VIANA, Françoise Santana. **Análise de Desempenho Térmico em módulo de contêiner marítimo**. Universidade Federal De Ouro Preto, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252><http://dx.doi.org/>>.
- VIANA, F. S.; SOUZA, H. A. de; GOMES, A. P. Residência em contêiner: comparativo de estratégias para a melhoria do desempenho térmico. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019011, 2019.
- WANG, C.; ZHU, Y.; QU, J.; *et al.* Automatic air temperature control in a container with an optic-variable wall. **Applied Energy**, v. 224, n. May, p. 671–681, 2018.
- WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- YANG, L.; YAN, H.; LAM, J. C. Thermal comfort and building energy consumption implications - A review. **Applied Energy**, v. 115, p. 164–173, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>>.

ZHANG Y.; JANKOVIC L. JEA, An Interactive Optimisation Engine for Building Energy Performance Simulation, **IBPSA Building Simulation 2017**, August 7-9, San Francisco, USA.

7. APÊNDICES

7.1. APÊNDICE A – Análise de alguns editais de compra / locação de contêineres

APENDICE A

Apresentação das Especificações Técnicas de Contêineres encontradas em editais de organizações militares do Exército, separadas por Unidades de Administração de Serviços Gerais (UASG), no portal Compras Governamentais, entre os anos de 2017 e 2020, com alguns comentários preliminares, com base no conhecimento adquirido na pesquisa de mestrado até a qualificação:

1. UASG: 160079

- a. **Número do Edital / ano:** 01/2017;
- b. **Modalidade (locação ou aquisição):** aquisição;
- c. **Local de uso:** Santa Maria-RS;
- d. **Tipo de uso:** escritório;
- e. **Número de unidades previstas:** 8;
- f. **Valor estimado pelo órgão:** R\$ 149.850,00;
- g. **Especificações da envoltória:**

Itens: 02, 5 e 6. Aquisição de módulo habitável tipo container escritório / depósito / almoxarifado desmontável: fabricado em aço e aço galvanizado em perfis e estruturas tubulares, com sistema de fixação através de parafusos em suas colunas laterais e internas, revestido com chapas em eps ou similar tipo painéis termoacústicos com isolamento em eps ou similar 50 mm fixadas em perfis u piso em chapa impermeável antiderrapante de 21 mm, instalações elétricas com 4 pontos de luz (composto por luminárias 2 x 32 w fluorescentes com calha externa) e 10 tomadas; dimensão do módulo: 6000 mm x 2500 mm x 2620 mm. Cobertura em telha sanduíche tp 40 com forro em bandeja metálica na cor branco fosco; 1 ar condicionado de janela 12.000 BTU (tomada do tipo ar-stop com disjuntor e tomada 2p+t 25a, no novo padrão brasileiro, acoplados, circuito próprio)/ quente e frio; parede e teto: chapas principais preparada com fundo óxido (anticorrosivo). Pintura externa (parede e teto) a base de eps ou similar alta resistência à corrosão cor verde musgo e pintura interna (parede e teto) a base de epóxi, cor branca. Incluso conjunto de acessórios para fixação das divisórias, forros e portas / piso: piso em chapa impermeabilizada antiderrapante de # 21 mm (grifo do autor).

h. **Demais informações técnicas no edital:**

1.6.1. Os contêineres devem ser novos, ser desmontáveis, vedados, isentos de infiltração de água.

1.7. Os contêineres serão instalados sobre uma camada impermeabilizadora com h=10cm executada pela Contratante

i. **Observações faltantes:**

- faltou especificar o tipo e espessura do aço das paredes e teto;
- não tem nada sobre janela e a porta;
- deveriam ter exigido ar condicionado com etiqueta de eficiência energética PROCEL.

2. UASG: 160238

a. Número do Edital / ano: 03/2019 e 03/2020;

b. Modalidade (locação ou aquisição): locação;

c. Local de uso: Boa Vista-RR, Pacaraima-RR, Rio de Janeiro-RJ e Roraima-RR em 2019 e inclusão de Manaus em 2020, além das cidades já previstas em 2019;

d. Tipo de uso: escritórios e alojamentos;

e. Número de unidades previstas: 3.492 e 3.324 contêineres x meses, respectivamente para 2019 e 2020;

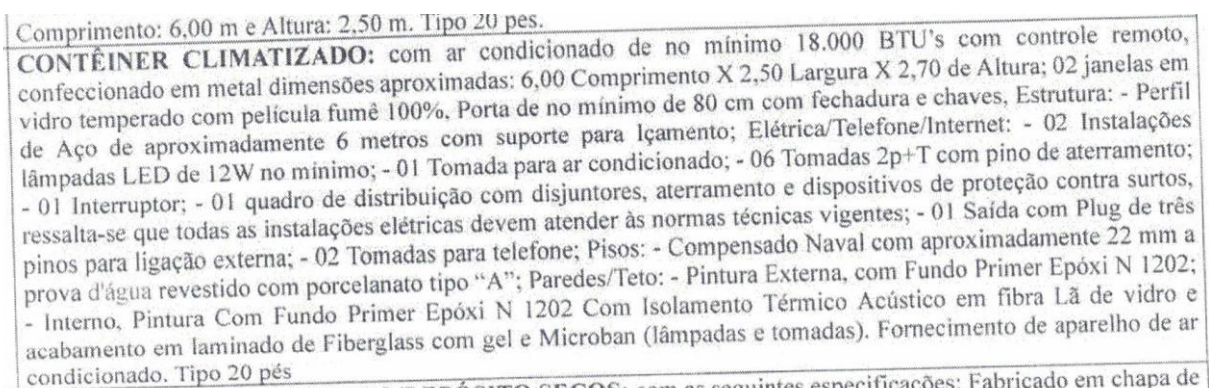
f. Valor estimado pelo órgão: R\$ 9.943.813,44 (2019) e R\$ 11.530.071,00 (2020);

g. Especificações da envoltória:

2019 - Itens 01, 05, 25, 29,41, 45, 65, 69. Contêiner tipo 20 pés para escritório / alojamento climatizado com ar condicionado de no mínimo 12.000 BTU, confeccionado em metal; dimensões aproximadas: 6,00 comprimento x 2,50 largura x 2,70 de altura; estrutura: - perfil de aço de aproximadamente 6 metros com suporte para içamento; elétrica/telefone/internet: - 02 instalações elétricas fluorescentes (110 v); - 01 tomada para ar condicionado com bandeja de apoio e disjuntor; - 02 tomadas para computadores com pino de aterramento; - 03 tomadas 2p+t com pino de aterramento; - 01 interruptor; - 01 caixa de distribuição com 03 disjuntores; - 01 saída com plug de três pinos para ligação externa; - 02 tomadas para telefone; pisos: - compensado naval de aproximadamente 22 mm a prova d água sem revestimento do piso de vinil; paredes/teto: - pintura externa, com fundo primer epóxi n 1202; - interno, pintura com fundo primer epóxi n 1202 com isolamento térmico acústico em fibra lã de vidro e acabamento em laminado de fiberglass (ou similar) com gel e microban (ou similar) (lâmpadas e tomadas). Fornecimento de aparelho de ar condicionado. Demais especificações conforme termo de referência.

2020:

Figura 1 – Trecho extraído do Termo de Referência Complementar, em pdf formato figura:



Fonte: Termo de Referência do Edital SRP nº 03/2020 – UASG 160238

h. Demais informações técnicas no edital:

- Há itens de contêineres frigorificados, refrigerados e almoxarifado com as mesmas especificações de envoltória que as apresentadas no subitem anterior.

i. Observações faltantes:

- De 2019 para 2020 foi aumentada a potência mínima do aparelho de ar condicionado de 12.000 BTU para 18.000 BTU, foram especificadas 2 janelas em vidro temperado com película fumê 100%, uso de lâmpadas de LED de 12 W; melhorou a especificação do frigorificado em 2020, mas ainda sem especificação da envoltória; aumentou a equipe que assina o termo de referência passou a ser maior em 2020.

- em ambas faltou a espessura do isolante térmico.

- pela ABNT NBR 15.220-3:2005, Boa Vista-RR, Manaus-AM e Rio de Janeiro-RJ fazem parte da Zona Bioclimática (ZB) 8 e recomenda-se as estratégias FIJ, aberturas para ventilação grandes e sombreadas e ventilação cruzada.

- Apesar de estarem na mesma ZB, pela INI-C (2021), estão em Grupos Climáticos diferentes (GC): Boa Vista-RR (GC 17), Manaus-AM (GC 18) e Rio de Janeiro-RJ (GC 13). Pela norma, os grupos GC 17 e GC 18 são mais parecidos, mas o GC 13 não apresenta muitas semelhanças.

3. UASG: 160219

a. Número do Edital / ano: 19/2018;

b. Modalidade (locação ou aquisição): aquisição;

c. Local de uso: Curitiba-PR;

d. Tipo de uso: escritório;

e. Número de unidades previstas e duração estimada: 1;

f. Valor estimado pelo órgão: R\$ 39.903,33;

g. Especificações da envoltória:

Container novo, tipo escritório, com as seguintes especificações: 1. Tamanho: medindo, no mínimo, 6 m de comprimento, 2,40m de largura e 2,60m de altura; 2. Estrutura: perfis metálicos, paredes, base e teto em estrutura de aço corten, em chapa ondulada de 2,6 mm, com a parte interna revestida de drywall, com isolamento termoacústico prensado entre as chapas metálicas em todas as paredes e no teto, 4 (quatro) descidas de água embutidas nas colunas, vedação em todos os cantos do container; 3. Piso: em compensado naval, no mínimo com 28 mm de espessura, forrado com emborrachado antiderrapante; 4. Pintura: em tinta naval anticorrosiva de alto desempenho na cor bege, com logomarca; 5. Janelas: 2 (duas) janelas de correr em vidro comum 1,50"1,00m (uma em cada lateral); 6. Porta: porta-balcão de correr em vidro temperado 8 mm, em quatro folhas de 1,00 m (duas folhas fixas nas extremidades e duas móveis no centro, para a abertura); 7. Instalações elétricas: padrão copel, fiação completa que permita a ligação com a rede de energia: a. Entrada de energia: 110 v e 220 v b. Tomadas elétricas: 8 (oito) tomadas com pino de aterramento, padrão nacional; c. Interruptores: 3 (três).

h. Demais informações técnicas no edital:

- não há

i. Observações faltantes:

- Sem referência à espessura do isolante térmico e do vidro da janela.

4. UASG: 160353

a. Número do Edital / ano: 08/2018, 06/2019 e 34/2020;

b. Modalidade (locação ou aquisição): locação;

- c. **Local de uso:** em 2018: Pacaraima-RR; em 2019: Boa Vista-RR e Pacaraima-RR
- d. **Tipo de uso:** escritório e dormitório;
- e. **Número de unidades previstas e duração estimada:** 48, 480 e 600 contêineres x meses para cada ano;
- f. **Valor estimado pelo órgão:** R\$ 157.176,00 (2018); R\$ 1.4820.720,00 (2019) e R\$ 1.837.005,00 (2020).

g. Especificações da envoltória:

Itens 4 e 5 de 2018 - LOCAÇÃO DO CONTÊINER PARA ESCRITÓRIO / DORMITÓRIO TIPO ALIANCE AZUL ROYAL COM DIMENSÕES MÍNIMAS 6,00 X 2,45 X 2,50, (modelo que atende ALIANCE AZUL ROYAL, SIMILAR OU SUPERIOR). Serviço de locação será contado por mês, 30 (trinta) dias, A contratada é responsável pelo transporte do contêiner (entrega e retirada) até o local determinado no §4.1 deste certame. Os honorários, direitos trabalhistas, alimentação, transporte, tornando o contratante isento de qualquer ônus. A contratada é responsável por toda e qualquer manutenção do contêiner seja ela preventiva, preditiva ou corretiva. Caso o contêiner torne-se indisponível a contratada deverá manteni-lo ou substituí-lo no prazo de 48 horas, não cumprindo o prazo o contratante ficará isento do pagamento dos dias parados.

Itens 4 e 5 de 2019 e 1, 2, 8 e 9 de 2020 - SERVIÇO DE LOCAÇÃO DE CONTÊINER PARA DORMITÓRIO / ESCRITÓRIO COM JANELAS E PORTAS, COM DIMENSÕES MÍNIMAS 6,00 X 2,30 X 2,40. O serviço de locação será contado por mês, 30 (trinta) dias, a contratada é responsável pelo transporte do CONTÊINER (entrega e retirada) até o local determinado no §4.1 deste certame. A contratada é responsável por toda e qualquer manutenção do CONTÊINER seja ela preventiva, preditiva ou corretiva. Caso o equipamento torne-se indisponível a contratada deverá manteni-lo ou substituí-lo no prazo de 72 horas, não cumprindo o prazo o contratante ficará isento do pagamento dos dias parados.

h. Demais informações técnicas no edital:

- em 2020:

5.1.2.1. Os contêineres devem atender as NBR ABNT 15575-4:2013 e demais normas necessárias à sua aplicação, bem como, a ABNT NBR 5410:2004, relativa a Proteção e segurança das instalações elétricas.

7.3.9. Nos contêineres que estejam previsto climatização, esta será viabilizada através de equipamentos de ar-condicionado (modelo convencional de janela ou split), de 10.000 a 18.000 BTU, conforme a necessidade, tais equipamentos serão fornecidos e instalados pela Contratada em quantidades suficientes para a adequada climatização dos ambientes. A manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos faz parte do escopo de serviços da Contratada

i. Observações faltantes:

- Não foram encontradas especificações para o tipo “Aliance Azul Royal”, utilizado em 2018;

- No termo de referência de 2020 cita a ABNT NBR 15.575-4:2013 - Edificações habitacionais — Desempenho: Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas, mas não indica quais níveis de desempenho as vedações devem atender.

- sem nenhuma especificação da envoltória e das esquadrias.