



XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

GERAÇÃO DE UMA POPULAÇÃO INICIAL PARA ANÁLISE MULTI OBJETIVO DE SIMULAÇÕES TERMOENERGÉTICAS EM HIS

Maurício Dorneles Caldeira Balboni (1); Rodrigo Karini Leitzke (2); Thalita dos Santos Maciel (3); Eduardo Grala da Cunha (4); Paulo Afonso Rheingantz (5)

- (1) Graduando, Ciência da Computação, mdcbalboni@inf.ufpel.edu.br, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, 96010-020, (53) 3284-5500
- (2) Graduado, Cientista da Computação, rodrigokarinileitzke@gmail.com, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, 96010-020, (53) 3284-5500
- (3) Graduada, Arquiteta, thalita-maciel@hotmail.com, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, 96010-020, (53) 3284-5500
- (4) Doutor, Arquiteto, eduardogralacunha@yahoo.com.br, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, 96010-020, (53) 3284-5500
- (5) Doutor, Arquiteto, parheingantz@gmail.com, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), R. Benjamin Constant, 1359 - Centro, Pelotas - RS, 96010-020, (53) 3284-5500

RESUMO

O alto consumo de energia elétrica e o baixo conforto térmico nas habitações de interesse social (HIS) no Sul do Brasil estão diretamente relacionados com a adequabilidade das prescrições normativas brasileiras e os planos estabelecidos pelo antigo Ministério das Cidades para o envelope das edificações. Através da simulação computacional é possível avaliar diferentes configurações de uma HIS utilizando soluções algorítmicas, como o caso das genéticas multiobjetivas, que testam diferentes combinações com o interesse de melhorar o desempenho de duas ou mais condições objetivo. Neste trabalho, propõe-se a geração de uma população inicial para uma análise genética multiobjetiva, alterando a transmitância térmica das paredes externas, do piso e da cobertura, além da orientação solar e das absorvâncias das paredes externas e da cobertura, com diferentes limites de valores pré-estabelecidos. A partir da análise dos resultados obtidos na simulação desta população para cidade de Pelotas-RS, observou-se que no melhor caso, um nível de conforto térmico para as horas ocupadas superior à 79% foi identificado, bem como uma intensidade de uso de energia elétrica (EUI) inferior à 32 kWh/(m².ano). Além desses resultados, a discussão apresenta alternativas para composição das próximas gerações do algoritmo, sugerindo mudanças e estratégias para os limites adotados na primeira geração da população. Palavras-chave: Otimização multiobjetivo, HIS, simulação computacional, EnergyPlus.

ABSTRACT

The high consumption of electric energy and the minimum thermal comfort level in the practices of social interest Housing (HIS) in Brazil are being compared with what is recommended for the constructive strategies in the Brazilian norms and those planned by the Ministry of Cities. Through the computer simulation, it is possible to obtain different configurations of one of its main characteristics, as in the case of multiobjective genetic tests, which test the combinations with the interest of improving the performance of two or more. In this work, we propose an initial series for a multiobjective genetic analysis, changing the thermal transmittance of the external walls, the floor and the roof, besides the solar orientation and the absorptances of the external walls and the roof with pre-established value limits. From the analysis of the results obtained in the inventory of data for the city of Pelotas-RS, it was observed that it is not better, thermal comfort for the hours occupied more than 79% was identified, as of the intensity of use of lower electric energy to 32 kWh / (m².year). In addition, the presentation presents alternatives for making the next generation of the algorithm, suggesting changes and strategies for the limits adopted in the first generation of the population.

Keywords: Multi-objective optimization, HIS, computer simulation, EnergyPlus

1. INTRODUÇÃO

Buscando reduzir o déficit habitacional existente no contexto brasileiro nos últimos anos, uma grande quantidade de unidades habitacionais foi construída e entregues a diversas famílias de baixa renda. Diante deste cenário, observou-se que por muitas vezes, a necessidade de larga escala de produção e o baixo investimento de materiais (BERR e FORMOSO, 2012), fez com que os programas responsáveis pelas construções de Habitações de Interesse Social (HIS) desconsiderasse particularidades locais e regionais relacionadas ao conforto térmico e desempenho termoenergético em que essas edificações seriam implantadas. Esta situação gerou uma problemática em relação à inserção climática, a possível diminuição de qualidade de vida dos usuários e o aumento do consumo energético.

A fim de melhor aplicação do conceito de unidades habitacionais de baixa renda, o aproveitamento dos recursos naturais torna-se ainda mais imprescindível diante das limitações econômicas de seus futuros usuários. Nesse contexto, as HIS devem, impreterivelmente, atender os requisitos mínimos de desempenho térmico determinados pela NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013), porém, os requisitos impostos pelas normas são pouco rigorosos e não dão garantia de edificações termicamente confortáveis e com eficiência energética comprovada (DALBEM et. al., 2018).

Nesse contexto, uma arquitetura com maior qualidade é aquela que preserva a relação dos usuários com o ambiente, considerando as interfaces entre o homem, o clima, o natural e o construído. A adequação ao lugar inserido contribui com a criação de espaços nos quais o aproveitamento do clima melhora as condições internas das edificações de forma natural, trazendo maiores condições de conforto térmico e tornando o edifício uma espécie de filtro do ambiente externo amenizando as sensações de desconforto impostas por climas muito rígidos, como excesso de calor, frio ou ventos (CORREIA, 2010).

Para o processo de avaliação dos modelos de HIS existentes considerando o que é preconizado pelo Plano Nacional de Habitação de Interesse Social (PlanHab) (MinCidade, 2009), a simulação computacional termoenergética é usualmente utilizada em pesquisas científicas que buscam identificar estratégias com o propósito de melhorar o desempenho térmico e energético das edificações (COAKLEY et. al., 2014).

Como instrumento para análise computacional da eficiência energética e do conforto das edificações, o software *EnergyPlus* (EP) é a ferramenta mais difundida em trabalhos com esta finalidade (SOUSA, 2012). Entretanto, embora o EP apresente uma vasta gama de possibilidades e estratégias de configurações para os modelos que serão simulados, parte significativa dos estudos com o seu uso tem se direcionado para análises paramétricas, evolucionárias e multiobjetiva, utilizando por vezes recursos de inteligência artificial (IA) para aumentar a complexidade das análises, tais como os apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Trabalhos relacionados com otimizações envolvendo o EP

Autor(es)	Objetivo	Estratégia de análise
(ZHANG; KOROLIJA, 2010)	Apresentar a ferramenta JEPlus desenvolvida para análises paramétricas com o EP.	Paramétrica
(CALAFIORE et. al., 2017)	Utilização de um software matemático relacionado com o EP para análise paramétrica.	Paramétrica
(WIJESURIYA et. al., 2018)	Análise paramétrica para materiais de mudança de fase em climas quentes e úmidos com o EP.	Paramétrica
(DAHLAN; ARIS, 2018)	Avaliação do desempenho de um edifício de escritório utilizando programação evolucionária.	Evolucionária
(DELGARM et. al., 2016)	Otimização multiobjetivo para avaliação da edificação com o EP por meio de enxame de partículas.	Multiobjetiva
(YU. et al, 2015)	Aplicação genética multiobjetivo para avaliação do conforto térmico e consumo de energia em edifícios.	Multiobjetiva
(OHTA; SATO, 2018)	Abordagem evolucionária multiobjetiva para determinar agendas de funcionamento para o ar condicionado em edificações residenciais.	Evolucionária/Multiobjetiva

Nas análises multiobjetivo, busca-se definir um conjunto de resultados satisfatórios considerando duas ou mais variáveis cujos valores resultantes da análise possam auxiliar nas inferências e análises comportamentais sobre o objeto de estudo (MIETTINEN, 2012). Geralmente estratégias como algoritmos genéticos (AG) são utilizadas como metodologia para o tratamento e análise dos dados multiobjetivo (todos os trabalhos com abordagem multiobjetiva presentes na Tabela 1 utilizam AG, por exemplo). As principais características dos AG consistem na utilização de uma população com representações abstratas gerada no

começo da aplicação. A ideia de evolução onde um conjunto de soluções é extraído da população e melhorado através de gerações. Em cada geração, as soluções são avaliadas, recombinadas ou mutadas (de acordo com o objetivo da análise), com o propósito de gerar uma nova população, que por sua vez, é usada como entrada para iteração seguinte do algoritmo. Este cenário se repete até que uma determinada condição seja satisfeita ou um número de gerações pré-definido tenha sido alcançado. (GEN e LIN, 2007).

2. OBJETIVO

A partir da configuração de um modelo de HIS de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), apresentar a geração da população inicial de alternativas construtivas para uma análise multiobjetivo, avaliando por meio de simulações termoenergéticas computacionais com o software EnergyPlus v. 8.7 (U.S. Department of Energy, 2018) o desempenho da edificação quanto ao nível de conforto térmico e o consumo de energia elétrica para 9600 simulações. A partir dos dados obtidos, os melhores resultados serão analisados individualmente considerando a curva de Pareto-ótimo (*Pareto-front*), que determina limites de interesse dentro do conjunto de resultados obtidos (VAN VELDHUIZEN e LAMONT, 1998).

3. MÉTODO

Este trabalho foi dividido em cinco etapas, na primeira delas foi realizada uma revisão sobre trabalhos relacionados com a temática da análise multiobjetiva para simulações termoenergéticas computacionais utilizando o software EP e as estratégias utilizadas na literatura para o desenvolvimento deste tipo de trabalho. Em seguida, foi definido o modelo de edificação que foi avaliado no estudo. Na terceira etapa foram definidas as variáveis e os intervalos de valores utilizados para análise multiobjetiva. A etapa seguinte apresenta a geração da população inicial a partir do conjunto de variáveis determinadas na etapa anterior e o plano para melhor utilização dos recursos computacionais durante as simulações com o EP. Por fim, foi realizada uma análise dos resultados obtidos, discutindo as estratégias possíveis para geração das populações seguintes na sequência deste estudo.

3.1. Definição da tipologia utilizada no estudo

O modelo utilizado para avaliação neste trabalho é uma habitação de interesse social unifamiliar desenvolvida no trabalho de Oliveira (2012), que atende as especificações mínimas da segunda fase do programa “Minha casa, Minha vida” (MinCidades, 2009).



Figura 1 - Edificação utilizada em perspectiva (OLIVEIRA, 2012)

A residência da Figura 1 possui 45,86m², com dois dormitórios, sala de estar e cozinha integradas e um banheiro. Cada compartimento foi definido como uma zona térmica. Como mostra a Figura 2 abaixo, a ZT 1 corresponde ao dormitório 1, a ZT 2 corresponde ao dormitório 2, a ZT 3 corresponde a sala de estar e cozinha e a ZT 4 corresponde ao banheiro.

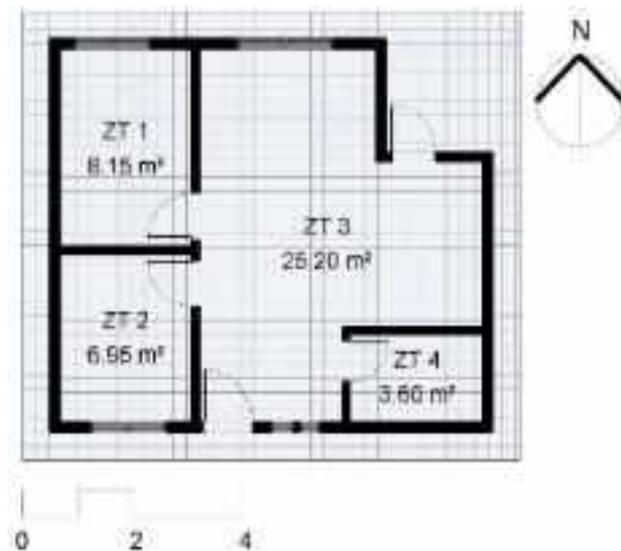


Figura 2 - Planta baixa (OLIVEIRA, 2012)

Para modelagem da edificação foi utilizado o software *Sketchup 2017* (Figura 3), com o uso do plugin *Euclid 0.93*.

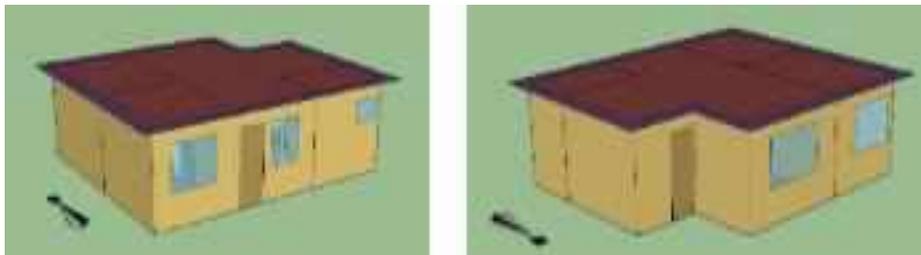


Figura 3 - Modelo do projeto arquitetônico no Sketchup

Quanto aos ganhos internos, uso e ocupação, iluminação e equipamentos, foram configurados de acordo com Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012). Para o sistema de climatização artificial (também configurado de acordo com o RTQ-R), o ar condicionado para os ambientes de permanência prolongada (dormitórios e sala-estar) é ativado no período da noite, das 21:00h às 8:00h, com setpoint de 22°C para aquecimento e 24°C para refrigeração, com coeficientes de performance (COP) de 2,75 e 3,00. A taxa de fluxo de ar por pessoa é de 0,00944 m³/s, a eficiência do motor é de 0,90, e a do ventilador é de 0,70. Durante o dia, a casa é ventilada naturalmente (sem o uso do ar condicionado), das 08:00h às 21:00h. Para realização da simulação, foi escolhida a Zona Bioclimática 2 (ZB2), representada pelo município de Pelotas - RS. A ZB2 é caracterizada pela grande amplitude de suas temperaturas ao longo do ano, com verão e inverno muito rigorosos (LEITZKE et. al., 2018).

Para definição do envelope do caso base, foram utilizados os materiais tradicionais da construção de habitações de interesse social no Brasil, de modo a atender aos requisitos de transmitância e capacidade térmica exigidos para a ZB2, conforme a NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Tabela 2 - Requisitos de desempenho térmico do envelope opaco - ZB2 (ABNT, 2013)

Paredes Externas	Cobertura
$U \leq 2,5$ e $CT \geq 130$	$U \leq 2,3$

U = Transmitância térmica (W/m²K); C = Capacidade Térmica (kJ/m²K)

As tabelas 3, 4, 5 e 6, apresentam as propriedades dos materiais dos elementos construtivos do modelo.

Tabela 3 - Composição das paredes externas

Composição	e (m)	λ (W/m.K)	p (kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	R ((m ² .K)/W)	CT (kJ/m ² .K)
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00
Bloco cerâmico	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00

e = espessura; λ = condutividade térmica; p = densidade térmica; R = resistência térmica; Ct = capacidade térmica

Tabela 4 - Composição das paredes internas

Composição	e (m)	λ (W/m.K)	p (kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	R ((m ² .K)/W)	CT (kJ/m ² .K)
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00
Tijolo Maciço	0,11	1,00	1800,00	0,92	0,11	182,16
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00

e = espessura; λ = condutividade térmica; p = densidade térmica; R = resistência térmica; Ct = capacidade térmica

Tabela 5 - Composição da cobertura

Composição	e (m)	λ (W/m.K)	p (kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	R ((m ² .K)/W)	CT (kJ/m ² .K)
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00
Bloco cerâmico	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00

e = espessura; λ = condutividade térmica; p = densidade térmica; R = resistência térmica; Ct = capacidade térmica

Tabela 6 - Composição da laje de piso

Composição	e (m)	λ (W/m.K)	p (kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	R ((m ² .K)/W)	CT (kJ/m ² .K)
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00
Bloco cerâmico	0,14	0,70	609,28	0,92	0,20	78,48
Argamassa	0,02	1,15	1800,00	1,00	0,02	36,00

e = espessura; λ = condutividade térmica; p = densidade térmica; R = resistência térmica; Ct = capacidade térmica

3.2. Variáveis e intervalos para análise multiobjetiva

A partir da composição inicial do modelo de edificação utilizado, é necessário definir as variáveis que serão alteradas na análise multiobjetiva e seus respectivos intervalos. Esta é uma etapa fundamental nos estudos que apresentam abordagens multiobjetiva como métrica para obtenção dos resultados, visto que a partir da definição de variáveis influentes e intervalos coerentes com o que apresenta a literatura, é possível estabelecer diretrizes com as quais as gerações seguintes do AG multiobjetivo poderá identificar populações mais significativas para a temática em questão.

Para este estudo, as transmitâncias térmicas (W/(m².K)) da parede externa, cobertura e piso foram alteradas (variando a espessura e a densidade equivalente do material “Bloco cerâmico” segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a)), bem como a orientação solar e a absorvância das paredes externas e cobertura. Os valores utilizados como limites da análise basearam-se no que preconizam o RTQ-R, a NBR 15220, a NBR 15575 e o trabalho de Silva e Ghisi (2013), que apresenta a sensibilidade dos valores termofísicos para o processo de simulação. As variáveis utilizadas neste trabalho e seus intervalos podem ser visualizados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Intervalos utilizados para geração da população inicial

Variável	Limite inferior	Limite superior	Iteração
Transmitância térmica da parede (W/(m ² .K))	0,3	2,5	0,01
Transmitância térmica da cobertura (W/(m ² .K))	0,3	2,3	0,01
Transmitância térmica do piso (W/(m ² .K))	1,0	4,0	0,01
Absortância da parede	0,2	0,9	0,1
Absortância da cobertura	0,2	0,9	0,1
Orientação (°)	0	315	45

3.3. Geração da população e estratégias para simulação

Para análise multiobjetiva, foram simulados 9600 casos, variando de forma pseudo-aleatória as variáveis de interesse de acordo com os parâmetros estabelecidos na Tabela 7, conforme sugerem as abordagens que utilizam AG para a geração da população inicial. Com a mesma configuração de envelope e orientação, 4800 destes casos utilizam condicionamento artificial e os outros 4800 utilizam ventilação natural. Desta forma, o conforto térmico da edificação analisado de acordo com os 80% de satisfação com o nível de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (INMETRO, 2012) e o consumo de energia avaliado segundo a intensidade do uso de energia elétrica da edificação (kWh/m².ano). Estes foram os objetivos preliminares do estudo, de modo que quanto maior o conforto térmico da edificação nos 4800 casos com ventilação natural e menor a intensidade do uso de energia elétrica nos casos com ar condicionado, melhores serão os casos obtidos na análise.

O processo de geração dos casos foi realizado através dos recursos oferecidos pela linguagem de programação *Python 3* (VAN ROSSUM e DRAKE, 2011), com uso das bibliotecas *Eppy* (PHILIP et. al., 2018) para alterar os parâmetros das propriedades térmicas e construtivas da edificação, *esoreader* (DAREN, 2018) para identificar os resultados através da saída *.eso da simulação com o EP e, por fim, *matplotlib* (HUNTER, 2007) para geração e exibição dos gráficos. A biblioteca *Eppy* (PHILIP et. al., 2018) também foi utilizada na execução dos casos com o EP, simulando de maneira paralela (de acordo com o número de núcleos de processamento disponíveis para simulação no computador utilizado) todos os 9600 casos gerados.

4. RESULTADOS

Através da plotagem dos resultados da simulação de toda população gerada, a Figura 4 abaixo apresenta um gráfico de dispersão contendo a relação entre a intensidade do uso de energia (EUI) (kWh/(m².ano)) e o conforto térmico de acordo com os 80% de satisfação do nível de conforto térmico da ASHRAE 55 (INMETRO, 2012), a curva de pareto-ótimo também é considerada na representação.

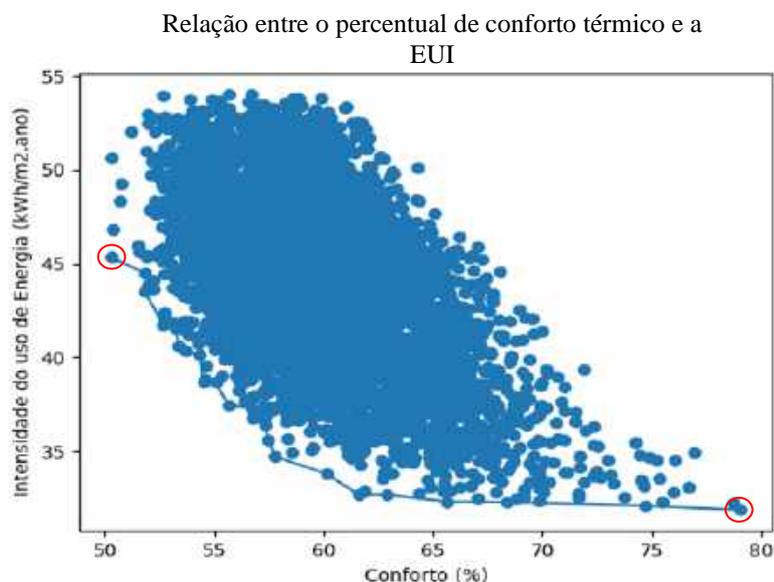


Figura 4 - Apresentação dos resultados gerais obtidos na simulação da primeira geração

A curva de pareto-ótimo definida na Figura 4 considerou a faixa de máximos locais onde foram priorizados os resultados com maior conforto térmico e menor intensidade do uso de energia elétrica, desta forma, é possível fazer um recorte desses máximos locais sem descartar nenhum dos casos, visto que entre os dois pontos circulado de vermelho (próximos a 45 kWh/(m².ano) e 80% de conforto térmico nas horas ocupadas), encontra-se o intervalo de amplitude dos resultados possíveis.

Recorte dos resultados com base no limite superior de pareto

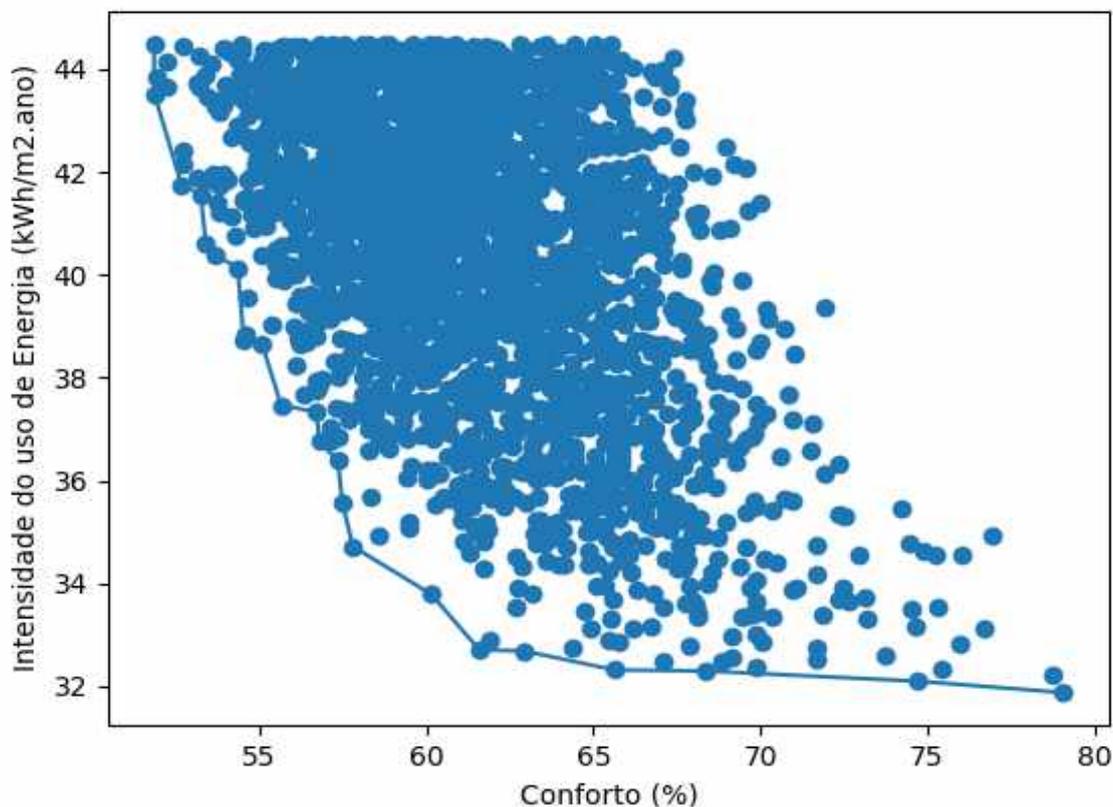


Figura 5 - Recorte dos resultados desconsiderando os casos acima do ponto superior de pareto

Como mostra a Figura 5, a curva de pareto é uma estratégia interessante para redução das possibilidades pouco eficientes na simulação, visto que a exclusão dos resultados acima do ponto superior de pareto representa uma redução de aproximadamente 37% da população gerada inicialmente. Essa estratégia de redução da população com base no pareto-ótimo pode ser repetida considerando as mudanças nos limites utilizados inicialmente a fim de obter resultados mais satisfatórios nos objetivos pretendidos (maior percentual de conforto térmico e menor intensidade no uso de energia elétrica, neste trabalho), caracterizando o processo de evolução dos AG.

Criando um outro recorte com base nos pontos de pareto para os melhores casos obtidos na primeira geração da simulação, foi estabelecido um critério de conforto térmico de pelo menos 70% com intensidade do uso de energia menor ou igual à 45 kWh/(m².ano), estes valores foram escolhidos por representarem uma amostra da população possivelmente apta a alcançar os limites de 80% e 90% de conforto térmico nas horas ocupadas preconizados pelo RTQ-R (INMETRO, 2012) nas gerações seguintes do algoritmo, considerando que nesta análise estes foram os resultados que mais se aproximaram desta situação.

A Figura 6 abaixo apresenta este novo recorte da população inicial, a amostra possui 114 resultados, com percentuais de conforto térmico nas horas ocupadas que variam de 68,40% à 79,07% e o consumo através da intensidade do uso de energia elétrica variando entre 31,88 kWh/(m².ano) e 42,15 kWh/(m².ano), essa amostra representa apenas 2,38% da amostra inicial, contendo os resultados mais satisfatórios da primeira geração do algoritmo.

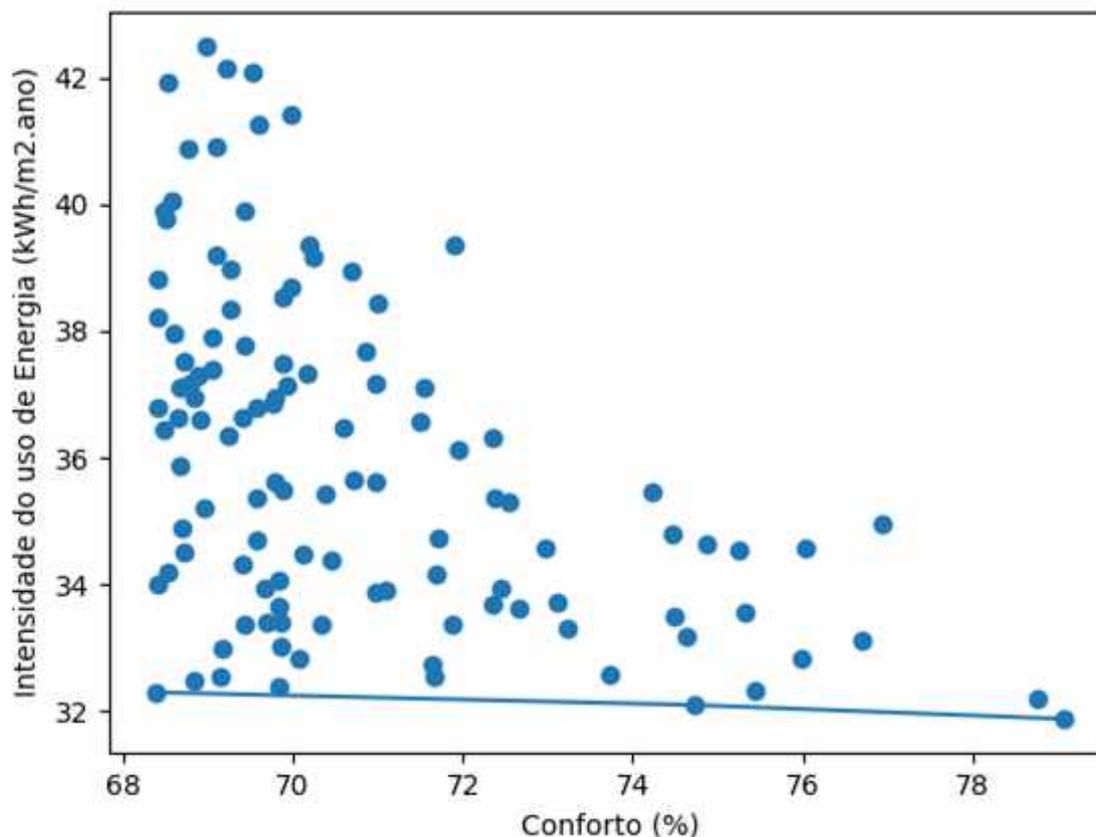


Figura 6 - Recorte dos resultados desconsiderando os casos acima do ponto superior de Pareto

Ainda sobre a amostra apresentada na Figura 6, a média de transmitância térmica de parede sorteada foi de $0,68 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, para cobertura $0,62 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e para o piso $1,90 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Para orientação da edificação e absorvâncias de parede e cobertura, considerando as frequências de ocorrência por se tratarem de limites menores nestes três casos, a orientação com maior frequência de ocorrência foi a Norte (0°), com maior frequência de absorvâncias nas paredes e coberturas de $0,8$. Estes valores apresentam um padrão considerando os casos testados para Pelotas-RS (ZB2), que considera o envelope isolado (transmitâncias térmicas menores considerando os fechamentos opacos verticais e horizontais), com maior eixo orientado para o Norte e absorvância alta (tanto nas paredes quanto na cobertura) as configurações com resultados mais representativos deste estudo multiobjetivo para primeira geração do algoritmo.

5. CONCLUSÕES

Considerando a análise proposta por este trabalho, é possível identificar resultados interessantes no que diz respeito a possíveis variações dos limites adotados inicialmente para geração da população inicial. Embora a maior parte dos casos gerados pela primeira geração do algoritmo tenha apresentado resultados com alta intensidade do uso de energia elétrica e conforto térmico para as horas ocupadas entre 50 e 70%, os padrões observados no final da discussão dos resultados para Pelotas-RS, apresentam um indicador de variações significativas nos limites, podendo-se obter uma redução de até 73% para as transmitâncias térmicas de parede e cobertura quando comparado o valor médio com o limite superior adotado inicialmente conforme a NBR 15575 (ABNT, 2013). Além disso, considerando apenas os resultados da amostra mais significativa, as orientações Norte e Noroeste foram selecionadas em aproximadamente 66% dos casos. Para as absorvâncias das paredes externas, em 81% dos casos valores maiores do que $0,6$ foram selecionados, já para a absorvância da cobertura, 78% dos casos selecionaram valores acima de $0,6$.

Cabe salientar que o edifício é um sistema, e neste sentido a variação de cada variável tem um impacto nas demais, a identificação destes padrões pode indicar possibilidades para o algoritmo genético multiobjetivo evoluir nas gerações seguintes, entretanto, essas possibilidades precisam ser testadas a fim de definir o real desempenho destes indicadores no desempenho da edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: 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. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 15.575**: Edificações Habitacionais - Desempenho. [S.l.]:Rio de Janeiro, 2013.
- BERR, L. R.; FORMOSO, C. T.. **Método para avaliação da qualidade de processos construtivos em empreendimentos habitacionais de interesse social**. Ambiente construído: revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre. Vol. 12, n. 2 (abr./jun. 2012), p. 77-96, 2012.
- CALAFIORE, G. et al. **APSEplus: a MATLAB toolbox for parametric energy simulation of reference buildings**. In: Proceedings of the 6th International Conference on Software and Computer Applications. ACM, 2017. p. 267-271.
- COAKLEY, D.; RAFTERY, P.; KEANE, M. **A review of methods to match building energy simulation models to measured data**. Renewable and sustainable energy reviews, v. 37, p. 123-141, 2014.
- CORREIA, L. A.; ROMERO, ROMERO, M. A. B. **Conforto Ambiental e suas relações subjetivas: análise ambiental integrada na Habitação de Interesse Social**. In: 2º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2011. Rio de Janeiro. Anais do SBQP, 2011. p. 265-276.
- DAHLAN, N. Y.; ARIS, A. A. M. **Optimizing Energy Baseline for Medium Size Office Using Hybrid EnergyPlus-Evolutionary Programming (EP)**. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC), v. 10, n. 1-4, p. 59-65, 2018.
- DALBEM, R.; CUNHA, E. G. ; RHEINGANTZ, P. A. ; VICENTE, R. ; SILVA, A. C. S. B. . **Atender às normas de desempenho é indicativo de conforto térmico na edificação de uso habitacional?**. ARQUITEXTOS (SÃO PAULO), v. 211, p. 03, 2018.
- DAREN, T. **A module for parsing EnergyPlus *.eso files**. Disponível em: <<https://pypi.org/project/esoreader/>>. v. 1.2.3, 2018.
- DELGARM, N. et al. **Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO)**. Applied energy, v. 170, p. 293-303, 2016.
- GEN, M.; LIN, L.. **Genetic algorithms**. Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, p. 1-15, 2007.
- HUNTER, John D. **Matplotlib: A 2D graphics environment**. Computing in science & engineering, v. 9, n. 3, p. 90, 2007.
- INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética Edificações Residenciais**. Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012. Acessado em Abril de 2019. Disponível em:<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>.
- LEITZKE, R. K. et al. **Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas.epw Case**. Journal of Civil Engineering and Architecture, v. 12, p. 741-756, 2018.
- MIETTINEN, K. **Nonlinear multiobjective optimization**. Springer Science & Business Media, 2012.
- MINCIDADES. **Programa "Minha casa, minha vida"**. Governo Federal, SL, [S.l.], 2009.
- OHTA, Y.; SATO, H. **Evolutionary multi-objective air-conditioning schedule optimization for office buildings**. In: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. ACM, 2018. p. 296-297.
- PHILIP, S.; TRAN, T.; TANJUATCO, L. **eppy: scripting language for E+**. **EnergyPlus** (versão 0.548)[Software-GNU AFFERO GENERAL PUBLIC LICENSE]. Disponível em: <<https://pypi.org/project/eppy/>>. v. 0.548, 2018.
- SILVA, A. S.; GHISI, E. **Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R**. Ambiente Construído, v. 13, n. 4, p. 135-148, 2013.
- SOUSA, J. **Energy simulation software for buildings: review and comparison**. In: International Workshop on Information Technology for Energy Applications-IT4Energy, Lisabon. 2012.
- U.S. Department of Energy. **EnergyPlus™ Version 8.7.0 Documentation - Input Output Reference**. EUA, 2018.
- VAN ROSSUM, G.; DRAKE, F. L. **Python language reference manual**. 2003.
- VAN VELDHUIZEN, D. A.; LAMONT, G. B. **Evolutionary computation and convergence to a pareto front**. In: Late breaking papers at the genetic programming 1998 conference. 1998. p. 221-228.
- YU, W. et al. **Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design**. Energy and Buildings, v. 88, p. 135-143, 2015.
- WIJESURIYA, S.; BRANDT, M.; TABARES-VELASCO, P. C.. **Parametric analysis of a residential building with phase change material (PCM)-enhanced drywall, precooling, and variable electric rates in a hot and dry climate**. Applied energy, v. 222, p. 497-514, 2018.
- ZHANG, Y.; KOROLJIA, I. **Performing complex parametric simulations with jEPlus**. In: SET 2010-9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES, 2010. Anais. . [S.l.: s.n.], 2010. p.24–27.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Programa de demanda social (DS), bem como do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do RS (FAPERGS).