

ALGORITMOS MULTI OBJETIVO APLICADOS AO PROBLEMA DA REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS

Sérgio Tadeu¹, Rafael F. Alexandre², Marlon P. Lima²

¹ Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil – FCTUC,
Rua Sílvio Lima – Pólo II
CEP: 3030-790 – Coimbra, Portugal

² Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Computação e Sistemas
Rua 37, no 115, Loanda
CEP: 35931-026 – João Monlevade, MG, Brasil

sergio.tadeu@itecons.uc.pt, rfalexandre@decea.ufop.br, marlon@decea.ufop.br

RESUMO

A promoção da eficiência energética de edifícios de habitação pode ser obtida através da melhoria do desempenho da envolvente. Esta melhoria deve garantir o cumprimento de critérios de rentabilidade econômica, associados a um número de anos de vida útil do edifício. O presente trabalho avalia medidas de melhoria seguindo critérios de necessidade de energia primária e custo global, aplicáveis a edifícios de habitação portugueses anteriores a 1960. As diferentes possibilidades de envolventes dos edifícios cria um número de combinações elevado sendo que é desejado encontrar soluções eficientes com baixo custo computacional. O trabalho compara dois algoritmos evolucionários multiobjetivo apresentando seus resultados em termos de indicadores de qualidade conhecidos como *Hypervolume*, *Generational Distance (GD)*, *Inverted Generational Distance (IGD)* e *Spread*. Os resultados demonstram que os algoritmos propostos foram eficientes, necessitando de poucas avaliações de soluções para encontrar soluções presentes na fronteira Pareto ótima do problema.

PALAVRAS CHAVE. Reabilitação Energética, Edifícios, Otimização Multiobjetivo

Área principal (Otimização Combinatória, Apoio à Decisão Multicritério)

ABSTRACT

Promoting energy efficiency of residential buildings can be achieved by improving the building envelope. This improvement must ensure compliance of cost optimality criteria associated with a number of years of lifespan of the building. This study evaluates improvement measures following primary energy need criteria and global cost applicable to Portuguese residential buildings constructed before 1960. The different possibilities of building envelope create a high number of combinations in which is desired to find efficient solutions with low computational cost. The study compares two multiobjective evolutionary algorithms and presents its results in terms of quality indicators known as *Hypervolume*, *Generational Distance (GD)*, *Inverted Generational Distance (IGD)* and *Spread*. The results demonstrate that the proposed algorithms were effective requiring few evaluations of the solutions to find solutions contained in Pareto optimal front of the problem.

KEYWORDS. Energy retrofitting, Buildings, Multiobjective Optimization.

Main area (Combinatorial Optimization, Multicriteria Decision Support)

1. Introdução

O setor da construção civil e o uso de edificações são responsáveis por grandes impactos ao meio ambiente, no que tange às emissões de dióxido de carbono. Sabe-se que estas emissões são prioritariamente provenientes do uso de energia, sendo que os edifícios geram um impacto no consumo de energia a longo prazo. Na União Europeia (UE), os edifícios residenciais representam cerca de 75% do total das edificações, sendo que os edifícios unifamiliares representam 64% do parque habitacional europeu conforme o *Buildings Performance Institute Europe* (2011). Especificamente em Portugal, em 2010, o setor residencial contribuiu para cerca de 18% do consumo final de energia, dos quais 30% se refere ao consumo de eletricidade. Neste sentido, as edificações mais antigas (construídas antes de 1960) representam uma percentagem considerável dos edifícios (29%), sendo estas responsáveis por valores muito elevados de consumos energéticos para aquecimento conforme o Instituto Nacional de Estatística (2011). Cerca de 1/4 do parque imobiliário existente na Europa foi construído em meados do século passado, registando uma idade superior àquela definida como vida útil teórica em países europeus (cerca de 50 a 60 anos) conforme *United Nations Environment Programme* (2007). Com isso, grande parte desses edifícios, muitas vezes valorizados pela sua importância cultural, arquitetônica e até mesmo histórica, não só refletem o caráter único e a identidade das cidades europeias, como também apresentam baixo desempenho energético. Estes edifícios antigos continuam a usar sistemas convencionais ineficientes, que tipicamente são associados a altos custos de energia, além de maiores emissões de CO₂. Assim, faz-se necessária a realização de intervenções para adequar estes edifícios, em termos de eficiência energética, buscando uma economia de energia.

Portugal é um dos países da União Europeia que mais avançou em termos de legislação aplicável às energias renováveis e eficiência energética nas edificações. Além disso, ele é o país com a terceira meta mais ambiciosa de produção de eletricidade limpa de toda a UE, que foi de 45% em 2010, atrás da Suécia (60%) e Áustria (78%). O governo português aposta nas energias renováveis como forma de relançar a indústria portuguesa, fomentando o *knowhow* e elevando o país a uma posição de destaque nesta área. Estudos como esse podem aportar conhecimento e fomentar investimentos à eficiência energética em edifícios no Brasil. Em tempos de crise energética e elevações das tarifas de energia, como as que estamos vivenciando atualmente, soluções como as apresentadas neste estudo tornam-se relevantes em termos de sustentabilidade, ou até mesmo podem contribuir para uma futura legislação que defina as metas de eficiência energética mais ambiciosas, a serem cumpridas pelas edificações.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo entre dois algoritmos especialmente projetados para encontrar soluções eficientes para um problema combinatório que considera uma série de características de edificações. Estes algoritmos buscam soluções que apresentem menor Necessidade de Energia Primária (NEP) total e menor custo global. Entretanto, existe uma relação de compromisso (conflito) entre estas duas grandezas visto que, edificações com menor energia primária total tendem a possuir elevado custo de investimento. Assim, dois algoritmos de otimização multiobjetivo foram utilizados para encontrar o conjunto aproximado de soluções Pareto eficientes do problema.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma revisão da literatura. Na seção 3, o cenário de estudo utilizado neste trabalho é definido. A seção 4 apresenta o modelo matemático utilizado para as simulações apresentadas neste trabalho. Na sessão 5 são apresentados os operadores genéticos e dois algoritmos utilizados para solucionar o problema e na sessão 6, é realizada uma comparação entre os algoritmos propostos. Por fim, as conclusões e propostas de trabalhos futuros são expostas na seção 7.

2. Revisão da literatura

Em Portugal, muitos edifícios encontram-se degradados e necessitando de reformas. Deste modo, atuar na restauração de edifícios antigos não é só uma necessidade atual, como também representa um elevado potencial para melhorar o seu comportamento energético, contribuindo para economia de energia a longo prazo. A legislação existente em Portugal preconiza que estes devam passar a cumprir requisitos mínimos de desempenho energético, caso sejam submetidos a uma grande intervenção de reabilitação conforme o Ministério da Economia e do Emprego (2013). As restaurações dos prédios portugueses existentes representam somente 6,5% do total da atividade do setor da construção, índice muito inferior ao da média europeia, situada nos 37%. De acordo com o Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia (2013), os recentes dados nacionais de recenseamento da população e habitação, existem cerca de dois milhões de prédios que necessitam de recuperação, o que representa cerca de 34% do parque habitacional nacional. Ainda que as grandes reformas nos edifícios consistam em intervenções complexas, diferentes estratégias podem ser utilizadas para promover o cumprimento de critérios fundamentais de sustentabilidade, mas com viabilidade econômica.

A seleção das intervenções a ser executadas deve se basear na quantificação de parâmetros associados à rentabilidade econômica destas possíveis soluções. Assim, a Diretiva de Desempenho Energético em Edifícios (EPBD), conforme a Comissão Europeia (2010) propôs o desenvolvimento de um quadro metodológico comparativo para calcular os níveis ótimos de rentabilidade. Em 2012, foi publicado o Regulamento Delegado (UE) n.º 244, conforme a Comissão Europeia (2012), que complementa a EPBD, especificando regras para comparação de medidas de eficiência energética, utilizando uma abordagem de custo-ótimo. Este quadro metodológico é baseado no desempenho em consumo de energia primária das várias soluções propostas e nos seus respectivos custos globais de implementação. Para este efeito devem ser realizadas análises macroeconômicas e financeiras. Para estas análises revela-se importante a definição de um edifício de referência, representativo do parque imobiliário existente. Diferentes abordagens têm sido propostas para a definição deste edifício de referência Corgnati et al. (2013).

Para a análise da rentabilidade econômica, importa contabilizar e analisar as várias combinações de possíveis intervenções a serem realizadas na reforma do edifício. Em Portugal, as principais medidas de melhoria no consumo de energia em edifício residencial, resumem-se quase sempre à aplicação de isolamento térmico na envolvente opaca, à substituição de sistemas de climatização e aquecimento de águas por equipamentos mais eficientes e à substituição de vãos envidraçados. Muitos estudos visam determinar um custo-ótimo deste tipo de intervenções, quer aplicadas de forma isolada quer em conjunto. Assim, o aumento da resistência térmica da envolvente opaca pode reduzir significativamente o consumo de energia com climatização. Contudo, uma solução com elevada espessura de isolamento pode não ser desejável, perante questões arquitetônicas e funcionais Jelle (2011). Além disso, o benefício econômico de intervenções de melhoria para cada elemento da envolvente depende, não só do investimento envolvido, mas também do custo de operação do sistema de aquecimento/arrefecimento em termos globais. Desta forma, o aumento do isolamento térmico pode ser pouco representativo na economia de energia utilizada para aquecimento ou arrefecimento do ambiente e não representar a solução com custo-ótimo Hamdy et al. (2013) Tadeu et al. (2013).

A determinação da espessura ótima de isolamento da envolvente dos edifícios e o seu efeito no consumo de energia tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores Kaynakli (2012). Neste sentido, Nuri Sisman et al. (2007) determinaram a espessura ótima de isolamento térmico para uma habitação em diferentes regiões da Turquia. Na Grécia, Axaopoulos et al. (2014) determinaram a espessura ótima de isolamento de paredes exteriores num edifício residencial, em função da orientação, direção do vento e posição do isolante na parede. As necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento foram obtidas por simulação dinâmica horária, na qual os autores consideraram a influência do vento através do coeficiente de transferência de calor por convecção, resultando em espessuras ótimas entre os 7,1 cm e 10,1 cm. A pesquisa concluiu

que ventos prevalentes do norte favorecem a parede orientada a norte na estação de arrefecimento, contudo incrementam significativamente os consumos no inverno. A parede orientada a sul é a que possui menos necessidade de aquecimento, enquanto que a parede orientada a oeste possui o valor um maior consumo de arrefecimento. Neste caso, a colocação de isolamento térmico pelo exterior revela-se mais rentável.

Outros autores estudaram a combinação de diferentes medidas de eficiência energética. Verbeeck e Hens (2005) investigaram a viabilidade econômica de medidas de reabilitação em cinco habitações representativas do parque edificado belga. O desenho e dimensionamento do sistema de aquecimento está diretamente relacionado com a qualidade da envolvente. Assim, numa primeira fase, os autores estudaram soluções de redução de consumos dos edifícios, como isolamento da envolvente e melhorias nas áreas envidraçadas e, numa segunda fase, combinaram essas medidas com sistemas mais eficientes. Deste modo, não é necessário adaptar o sistema depois da aplicação do isolamento na envolvente, concluindo que é benéfico investir em primeiro lugar no isolamento.

Em Portugal, Panão et al. (2013) investigou o consumo de energia em um conjunto de edifícios catalogados por época de construção, incluindo edifícios reais e teóricos. Embora os estudos de casos selecionados não sejam edifícios de referência nacionais, foi possível verificar o potencial de redução das necessidades de energia primária em função da época de construção dos edifícios. Neste trabalho foi realizada uma análise de custo-ótimo de soluções de reforma que indicou espessuras ótimas de isolamento para fachada e cobertura. Neste estudo não foi realizada qualquer análise de sensibilidade.

Na Grécia, Nikolaidis et al. (2009) avaliaram, do ponto de vista econômico, diversas medidas de eficiência energética num edifício típico. Os autores concluíram que a medida de economia de energia mais efetiva é a melhoria do sistema de iluminação, do isolamento da cobertura e a colocação de controladores automáticos de temperatura. Contudo os resultados dependem do método de avaliação econômico utilizado (valor presente líquido (VPL), razão entre a economia e o investimento, além do tempo de retorno do investimento). O critério de decisão e avaliação da rentabilidade do VPL, também escolhido pela Comissão Europeia, é um dos indicadores mais confiáveis para a avaliação deste tipo de opções de investimento Brealey et al. (2001). Kumbaru e Madlener (2012) investigaram o ótimo econômico de várias medidas de reforma de um edifício administrativo de 1900, na Alemanha. Diversas alternativas de investimento foram estudadas e eles concluíram que os preços de energia têm uma importância significativa na avaliação de investimentos em melhorias.

A abordagem da rentabilidade de medidas de eficiência energética contempla uma enorme quantidade de variáveis que se inter-relacionam. Vários autores têm proposto análises de otimização multiobjetivo para ultrapassar o desafio de lidar com um grande número de variáveis Hamdy et al. (2013) Malatji et al. (2013) Asadi et al. (2012). O método proposto neste trabalho procura reduzir a quantidade de combinações, sem prejuízo de análise.

3. Definição do caso de estudo

O objeto de estudo deste trabalho concentra-se em habitações unifamiliares construídas em Portugal, antes de 1960, segundo critérios de rentabilidade econômica. Para este efeito, foi utilizado um edifício de referência, na qual foi definido o cálculo das necessidades nominais de energia de climatização, que seria de acordo com o método sazonal definido na norma EN ISO 13790: 2008. O estudo recai assim na avaliação da variabilidade dos resultados em função dos seguintes parâmetros: dados climáticos da localização do edifício; combinação de diferentes medidas de melhoria de eficiência energética; custos de intervenção (dando-se particular atenção à interação do custo de isolamento com o custo de aquecimento); variação das necessidades de energia útil em função dos efetivos hábitos de consumo; diferentes evoluções dos custos de energia e opções de taxas de desconto. As avaliações da influência da variabilidade de todos estes fatores

revelam-se assim de extrema importância na aplicação do quadro metodológico comparativo conforme o *Buildings Performance Institute Europe* (2013).

O edifício em estudo, uma habitação unifamiliar de tipologia T2 (dois quartos) com 80 m², possui um sistema para aquecimento com eficiência nominal de 1,00 e um sistema para preparação de águas quentes sanitárias (AQS) com eficiência nominal de 0,60. Os coeficientes de transmissão térmica iniciais U para cobertura, paredes e piso são 2,80, 2,00 e 1,65 W/(m².°C), respectivamente. Os cálculos são realizados utilizando-se os dados climáticos da cidade de Amarante, com 1.570 [°C-dia] (graus-dias - GD). Nas opções de reabilitação energética, foi utilizado isolamento em poliestireno expandido (EPS) em espessuras que variaram de 30 a 180 mm. A janela característica do edifício de referência apresenta vidro simples com fator solar de 0,85, moldura de madeira e coeficiente de transmissão térmica U de 5,1 W/(m².°C), sendo substituída por 10 alternativas diferentes nos pacotes de medidas. Os sistemas convencionais de aquecimento do ambiente considerados são o emissor elétrico, o ar condicionado, a caldeira a gás e a caldeira à biomassa. Os sistemas de energias renováveis são o coletor solar térmico termossifão, o coletor solar térmico de circulação forçada e o painel fotovoltaico. Foi aplicado um perfil de consumo para se gerar estimativas de desempenho energético da habitação mais próximas dos hábitos de climatização dos portugueses. A evolução dos preços de energia é estimada pela EU e está prevista até 2050 conforme a *United Nations Environment Programme* (2007).

4. Modelo matemático proposto

Neste trabalho, nós consideramos um problema de otimização multiobjetivo (MOP) em um contexto de minimização. Assim, o MOP é definido como em Coelho et al. (2007). Seja \mathcal{F} um conjunto de duas funções objetivo $\{f_1, f_2\}$, $f_i: \mathbb{R}^n \Rightarrow \mathbb{R}$, o MOP é definido como:

$$\text{Minimize: } \mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) = \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})\} \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \chi \subseteq \mathbb{R}^n \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m) \in \gamma \subseteq \mathbb{R}^m \quad (3)$$

sujeito a

$$x_i \in \{k_1, \dots, k_j\} \quad (4)$$

onde \mathbf{x} é um vetor de n variáveis de decisão, enquanto \mathbf{y} representa um vetor de objetivos com m dimensões. A restrição 4 representa os possíveis valores das variáveis x_i que ajudam a definir o espaço das variáveis de decisão ou espaço de decisão χ . As funções objetivo constituem um espaço multidimensional chamado espaço dos objetivos, definido como γ . Para cada solução $\mathbf{x} \in \chi_f$ existe um ponto \mathbf{y} no espaço dos objetivos. Assim, χ_f define a região factível do espaço dos objetivos γ_f . As funções objetivo, f_1 e f_2 , representam a Necessidade de Energia Primária e Custo Global, respectivamente. Estas funções objetivo são definidas pelas equações (5) e (6).

A Necessidade de Energia Primária (NEP), definido pela equação (5), resulta do somatório das necessidades de Energia para Aquecimento (EA), produção de Águas Quentes Sanitárias (AQS) subtraído das contribuições de Fontes de Energia Renováveis (FER), todas elas por metro quadrado de área útil e conforme indicado pela equação (5). Além disso, f_k representa a quota de energia útil necessárias para atender o sistema k , j representa as fontes de energia, e FC o fator de conversão entre a energia final e a energia primária. A constante η_k representa a eficiência do sistema k .

$$f_1 = \sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K \frac{f_k \times EA_j}{\eta_k} \right) \times FC + \sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K \frac{f_k \times AQS_j}{\eta_k} \right) \times FC - \sum_{j=1}^J \left(\sum_{k=1}^K FER_j \right) \times FC \quad (5)$$

O custo global (C_τ), definido pela equação (6), é calculado com base em um período τ em que, neste trabalho, consideramos 30 anos. Assim, o custo inicial (I_j), investido no ano τ_0 , é somado ao custo anual (C_{ij}) multiplicado pelo fator de desconto do ano i (D_i), para cada medida (ou conjunto de medidas) j . Este valor é subtraído do valor presente líquido residual do final do período de cálculo ($V_{30}(j)$). O fator de desconto, para o ano i (D_i), é baseado na taxa de desconto real r , como apresenta a equação (7).

$$f_2 = C(\tau) = \sum_{j=1}^N \left[I_j + \sum_{i=1}^{30} [C_{ij} D_i] - [V_{30}(j) D_{30}] \right] \quad (6)$$

$$D_i = \left(\frac{1}{1 + r/100} \right)^i \quad (7)$$

5. Algoritmos multiobjetivo propostos

O problema de otimização combinatório proposto neste trabalho é solucionado por dois Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos (MOEAs) baseados no *Non-dominated Sorting Algorithm II* (NSGA-II) Deb et al. (2002) e no *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA2) Zitzler et al. (2001). Estes algoritmos foram escolhidos por serem os mais populares da literatura e por apresentar bons resultados quando comparados com outras abordagens. Uma das principais características destes algoritmos é que eles trabalham com um conjunto de possíveis soluções conhecido como população e, através de operadores de cruzamento e mutação, buscam encontrar o conjunto de soluções ótimas para problemas multiobjetivo em uma simples execução. Os algoritmos propostos neste trabalho utilizam operadores de cruzamento e mutação especialmente projetados para solucionar o problema em questão. Estes operadores são responsáveis por manipular as soluções (indivíduos da população) em busca de novas soluções que possuam melhor aptidão. Em outras palavras, os algoritmos buscam por soluções mais próximas da fronteira Pareto ótima e, além disso, que estejam o mais espalhadas possível afim de cobrir toda a fronteira. Para isso, as soluções propostas neste trabalho são codificadas como um vetor onde cada posição corresponde a uma variável de decisão. Assim, as características técnicas do edifício são atribuídas a cada variável. Logo, cobertura (#1), paredes (#2), piso (#3) e envidraçados (#4) são características que representam o coeficiente de transmissão térmica U e seu efeito em necessidade de energia. As variáveis de aquecimento (#5), produção de água quente sanitária (#6) e fontes de energias renováveis (#7) são características de eficiência e seus efeitos no custo de energia. A variável HDD (*heating degree days*, #8) é utilizada para identificar a localização geográfica do edifício. A Figura 1 ilustra uma representação das soluções utilizadas onde cada posição tem um conjunto de possíveis valores factíveis.

$$S = \boxed{\#1} \boxed{\#2} \boxed{\#3} \boxed{\#4} \boxed{\#5} \boxed{\#6} \boxed{\#7} \boxed{\#8}$$

Figura 1. Representação das soluções utilizadas pelos algoritmos propostos.

A população inicial dos algoritmos é inicializada de maneira aleatória e o operador de seleção

utilizados é conhecido como Torneio Binário. O operador de cruzamento proposto é baseado em pontos de corte Coello et al. (2007). O exemplo ilustrado pela Figura 2 apresenta duas soluções hipotéticas ($parent_1$ e $parent_2$) para o problema, escolhidas pelo operador de seleção. Um ponto de corte c é escolhido de forma aleatória onde $0 < c < 8$. No exemplo apresentado, o ponto de corte escolhido é igual a 3. Assim, as duas novas soluções ($offspring_1$ e $offspring_2$) são construídas compostas por partes das soluções $parent_1$ e $parent_2$.

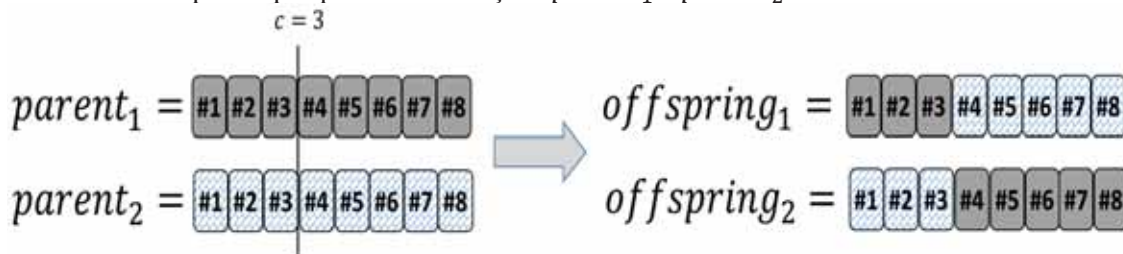


Figura 2. Ilustração do operador de cruzamento proposto.

O operador de mutação proposto para manipular as soluções construídas é baseado em um operador conhecido como *flip* mutation conforme Coello (2007). Neste procedimento, cada posição de determinada solução possui uma probabilidade p_m de ser alterado. Este operador é aplicado aos indivíduos resultantes do processo de cruzamento. Para cada posição do vetor selecionada de forma aleatória para ser alterado, um novo valor é obtido a partir do conjunto de valores factíveis. Este procedimento assegura que as novas soluções geradas sejam factíveis. O critério de parada dos algoritmos é o número de avaliações das funções objetivo.

6. Resultados e discussões

Com o objetivo de validar os algoritmos propostos, inicialmente foram avaliadas um conjunto de 154.000 possíveis soluções e, as não-dominadas, foram devidamente identificadas. Para construir todas estas soluções foi utilizado um algoritmo de força bruta fazendo combinando todas as variáveis de entrada. A Figura 3 apresenta os valores dos objetivos para todas as soluções avaliadas.

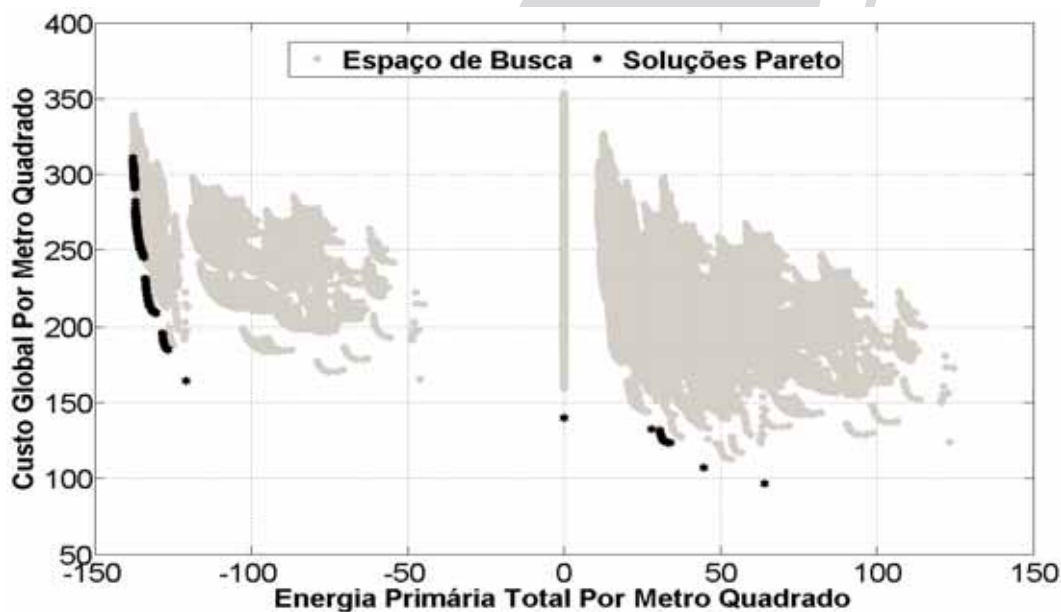


Figura 3 – Espaço de busca do problema considerando 154.000 soluções. As soluções em destaque representam as soluções não dominadas.

O gráfico acima mostra a distribuição das soluções no espaço dos objetivos, sendo possível observar agrupamentos que são atrelados a determinados equipamentos convencionais de aquecimento do ambiente (emissor elétrico, ar condicionado, caldeira a gás e caldeira à biomassa). No quadrante negativo por exemplo, destacam-se dois agrupamentos de soluções que incorporam painel solar fotovoltaico como sistema de fontes de energia renováveis, associado a dois sistemas convencionais distintos: ar condicionado (mancha da esquerda) e emissor elétrico (à direita). Os valores tornam-se negativos, pois o painel fotovoltaico produz mais energia do que a consumida no escopo deste estudo (aquecimento do ambiente e de águas sanitárias), sendo o excedente de energia totalmente aproveitado por outras aplicações (iluminação, eletrodomésticos etc.).

A identificação do conjunto de soluções ótimas para este problema possibilitou calcular de indicadores de qualidade conhecidos como *Hypervolume*, *Generational Distance* (GD), *Inverted Generational Distance* (IGD) e *Spread* Coello et al. (2007). Estes indicadores permitem avaliar o comportamento dos algoritmos e, a partir de testes estatísticos, identificar quais deles geram melhores resultados.

Os algoritmos propostos neste trabalho, baseados no NSGA-II e SPEA2, foram implementados em linguagem Java (JDK 1.6). O experimento foi realizado em um computador Intel Core i7, 2.2 GHz, com 8 GB de RAM e sistema operacional Windows 8.1. Os parâmetros utilizados para gerar os resultados são definidos pela Tabela 1. O critério de parada utilizado pelos algoritmos é o número de funções objetivo avaliadas.

Tabela 1. Parâmetros utilizados pelos algoritmos de otimização.

Parâmetro	Valor
Probabilidade de Cruzamento	0,9
Probabilidade de Mutação	0,04
Tamanho da População	50
Número de Avaliações das Funções Objetivo	500
Taxa de desconto	12%
Período de cálculo (τ)	30 anos
Área do edifício	80 metros quadrados

O experimento realizado executa os algoritmos propostos 33 vezes em ordem completamente aleatorizada. A cada execução dos algoritmos, as soluções não dominadas são armazenadas em um arquivo externo e, logo após, são calculados os indicadores de qualidade tomando como referência as soluções Pareto ótimas identificadas pelo algoritmo de força bruta. A Tabela 2 apresenta uma avaliação preliminar dos algoritmos baseados nos indicadores de qualidade definidos na primeira coluna. Os valores destacados indicam o algoritmo que obteve melhor performance em termos médios, sendo que o algoritmo baseado no NSGA-II apresenta resultados ligeiramente melhores que o SPEA2.

Tabela 2. Resultados dos indicadores de qualidade para 33 execuções dos algoritmos baseados no NSGA-II e SPEA2.

Indicador	Algoritmo	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão
<i>Hypervolume</i>	NSGA-II	0,70267	0,49496	0,61811	0,04644
	SPEA2	0,69763	0,51586	0,60700	0,04227
GD	NSGA-II	0,02564	0,00286	0,01186	0,00522
	SPEA2	0,02789	0,00491	0,01363	0,00508
IGD	NSGA-II	0,00717	0,00180	0,00394	0,00122
	SPEA2	0,00743	0,00178	0,00385	0,00146
<i>Spread</i>	NSGA-II	1,42372	1,17003	1,29960	0,06393
	SPEA2	1,30145	1,15689	1,25867	0,04733

A Tabela 3 apresenta os resultados estatísticos obtidos ao comparar os algoritmos propostos no trabalho. A hipótese nula (\mathcal{H}_0) considera que os dois algoritmos possuem a mesma performance ($\mu_1 = \mu_2$). A hipótese alternativa (\mathcal{H}_1) considera que existe diferença estatística entre os algoritmos ($\mu_1 \neq \mu_2$). Nós consideramos testes de primeira e segunda ordem similar aos propostos no trabalho de Fonseca et al. (2005). Além disso, o nível de confiança utilizado é de 95% ($\alpha = 0,05$). Os resultados sugerem que não podemos rejeitar a hipótese já que o valor da estatística p fornece um resultado maior que 0,05 para os testes de primeira e segunda ordem. Assim, podemos concluir que ambos algoritmos fornecem resultados semelhantes, embora as médias apresentadas pela

Tabela 2 demonstrem que o algoritmo baseado no NSGA-II apresenta resultados ligeiramente superiores.

Tabela 3. Análise estatística de primeira e segunda ordem. ($\alpha = 0,05$).

Tipo de teste	Teste Estatístico	Valor crítico	Valor p	Decisão
Primeira ordem	0,393939	0,484848	> 0,05	Não rejeitar
Segunda ordem	0,545455	0.606061	> 0,05	Não rejeitar

Afim de avaliar o comportamento dos algoritmos e observar as regiões do espaço dos objetivos onde os eles possuem melhor comportamento, foi utilizada a *Empirical Attainment Function* (EAF) Fonseca et al. (2005). Os resultados são apresentados pela Figura 4 onde podemos perceber que o algoritmo baseado no NSGA-II apresenta resultados ligeiramente superiores, com magnitude entre 0,2 e 0,4 em poucas regiões do espaço, quando comparado com o algoritmo baseado no SPEA2.

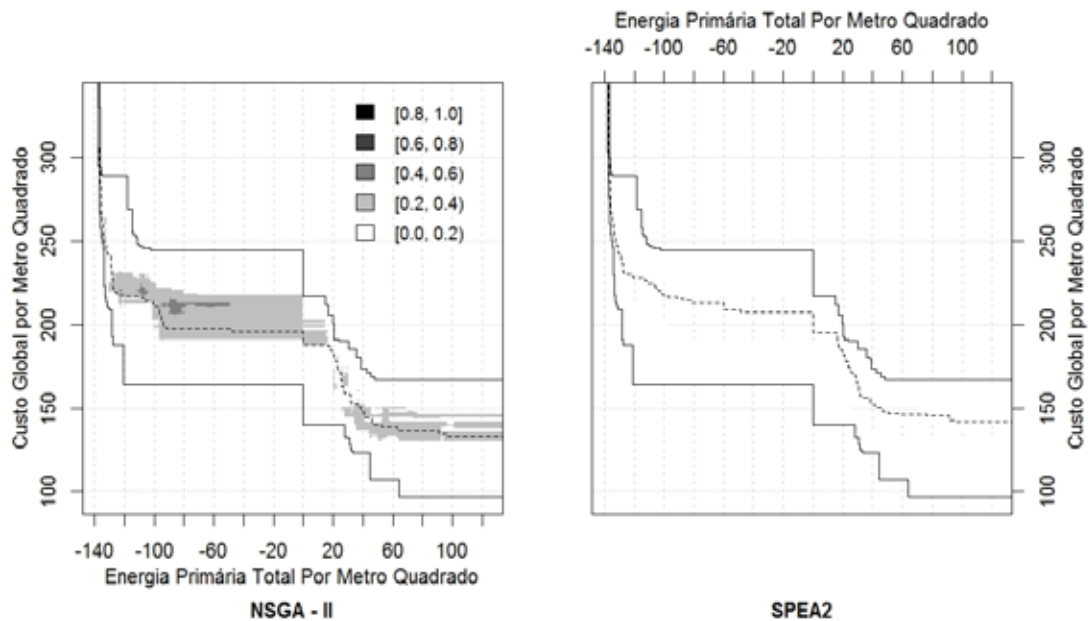


Figura 4. A esquerda, as diferenças em favor do NSGA-II e a direita, diferenças em favor do SPEA2. Em cinza, a magnitude das diferenças observadas.

7. Conclusões

O grande número estudos para a determinação da configuração ótima da envolvente demonstra a importância do tema. Este estudo apresentou o problema da otimização da rentabilidade de medidas de eficiência energética na reabilitação de edifícios. Os parâmetros essenciais do modelo proposto são o incremento de resistência térmica da envolvente, a eficiência do sistema de climatização, a localização do edifício, para além, claro, dos custos de intervenção. O espaço de busca do problema tratado consiste de 154.000 combinações de possíveis edifícios de referência. A representação das soluções bem como operadores de cruzamento e mutação especialistas para solucionar o problema foram apresentados. O problema de otimização foi resolvido em conformidade com as exigências do quadro metodológico proposto pela Comissão Europeia, utilizando-se dois algoritmos de otimização multiobjetivo: um baseado no NSGA-II e outro no SPEA2.

Para identificar as soluções ótimas do problema tratado, foi utilizado um algoritmo baseado em força bruta. Assim, os valores dos objetivos das soluções encontradas foram calculados e as soluções não dominadas devidamente identificadas. Afim de avaliar o comportamento dos algoritmos de otimização propostos, os indicadores de qualidade conhecidos como *Hypervolume*, *Generational Distance*, *Inverted Generational Distance* e *Spread* foram calculados. Os resultados sugerem que o algoritmo baseado no NSGA-II gera resultados ligeiramente superiores em termos destes indicadores. Além disso, uma análise estatística baseada *Attainment Function* foi realizada validando os resultados.

Este estudo sugere que o algoritmo de otimização proposto, baseado no NSGA-II, encontra soluções eficientes para o problema tratado sem necessidade de avaliar todo o espaço de busca. Assim, tomadores de decisão podem, sem grande esforço computacional, avaliar possíveis soluções levando em consideração a necessidade de energia primária por metro quadrado dos edifícios bem como o custo global da implementação da solução. Estudos futuros devem ser conduzidos na busca da proteção térmica verdadeiramente ideal para a envolvente do edifício, ferramentas de otimização mais adequadas à solução deste problema e algoritmos capazes de apoiar à tomada de decisão para escolha de soluções fornecidas pelos algoritmos de otimização.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte concedido pelo Programa Ciência sem Fronteiras por meio de bolsa de doutoramento [237489/2012-0], pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Referências

- Asadi, E., Silva, M. G. da, Antunes, C. H., e Dias, L.** (2012). Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy Build.*, vol. 44, pp. 81–87.
- Axaopoulos, I., Axaopoulos, P., e Gelezenis, J.** (2014). Optimum insulation thickness for external walls on different orientations considering the speed and direction of the wind. *Appl. Energy*, vol. 117, pp. 167–175.
- Buildings Performance Institute Europe** (2011). Europe's buildings under the microscope - A country-by-country review of the energy performance of buildings. p. 132.
- Buildings Performance Institute Europe** (2013). Implementing the cost-optimal methodology in EU countries.
- Brealey, R. A., Myers, S. C., e Marcus A. J.** (2001). *Fundamentals of Corporate Finance*. Third Edit. University of Phoenix.
- Coello, C., Lamont, G. e Veldhuizen, D.** (2007), *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problem*, 2nd Edition, Springer.
- Comissão Europeia** (2010). Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). J. Of. das Comunidades Eur., vol. L 153, pp. 13–35.
- Comissão Europeia** (2012). Regulamento Delegado (EU) N.o 244/2012 da Comissão de 16 de Janeiro que contempla a directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa ao desempenho energético dos edifícios. J. Of. das Comunidades Eur., vol. L 81, pp. 18–36.
- Corgnati, S. P., Fabrizio, E., Filippi, M. e Monetti V.** (2013). Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 983–993.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. e Meyarivan, T.** (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii, *Evolutionary Computation*, IEEE 6(2) 182-187.
- Fonseca, C., Fonseca, V. e Paquete, L.** (2005). Exploring the performance of stochastic multiobjective optimisers with the second-order attainment function, in: C. Coello Coello, A. Hernandez Aguirre, E. Zitzler (Eds.), *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Vol. 3410 of Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, pp. 250–264.
- Fokaides P., e Papadopoulos A. M.** (2014). Cost-optimal insulation thickness in dry and mesothermal climates: Existing models and their improvement. *Energy Build.*, vol. 68, pp. 203–212.
- Jelle B. P.** (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy Build.*, vol. 43, no. 10, pp. 2549–2563.
- Hamdy, M., Hasan, A., e Siren, K.** (2013). A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. *Energy Build.*, vol. 56, pp. 189–203.

INIVE EEIG (2010). *Stimulating increased energy efficiency and better building ventilation*. Bruxelas.

Instituto Nacional de Estatística (2010). Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010.

Kaynakli, O. (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 415–425.

Kumbaroğlu G., e Madlener, R. (2012). Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings. *Energy Build.*, vol. 49, pp. 327–334.

Loga, T., Diefenbach, N., Stein, B., Balaras, C. A., Villatoro, O., e Wittchen K. B. (2012). Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project, Institut Wohnen und Umwelt GmbH.

Malatji, E. M., Zhang, J., e Xia, X. (2013). A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision. *Energy Build.*, vol. 61, pp. 81–87.

MEE (2013). Decreto-Lei n.º118/2013 de 20 de agosto, Diário da República.

Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia (2014), Decreto-Lei n.º53/2014, *Diário da República*.

Nikolaidis, Y., Pilavachi, P., e Chletsis, A. (2009). Economic evaluation of energy saving measures in a common type of Greek building. *Appl. Energy*, vol. 86, no. 12, pp. 2550–2559.

Panão, M. J. N., M. O., Rebelo, P., e Camelo, S. M. L. (2013). How low should be the energy required by a nearly Zero-Energy Building? The load/generation energy balance of Mediterranean housing,” *Energy Build.*, vol. 61, pp. 161–171.

Papakostas, K. T., Papadopoulos, A. M., e Vlahakis I. G. (2005). Optimisation of thermal protection in residential buildings using the variable base degree-days method. *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 24, no. 1, pp. 19–31.

Sisman, N., Kahya, E., Aras, N., e Aras, H. (2007). Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey’s different degree-day regions. *Energy Policy*, vol. 35, no. 10, pp. 5151–5155.

Tadeu, S., Simões, N., Gonçalves, M., e Ribeiro, J. (2013). Energy efficiency measures in portuguese residential buildings constructed before 1960: a cost-optimal assessment. in *Energy for Sustainability 2013 - Sustainable Cities: Designing for People and the Planet*.

United Nations Environment Programme (2007). *Buildings and Climate Change*.

Verbeeck, G., e Hens, H. (2005). Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable?. *Energy Build.*, vol. 37, no. 7, pp. 747–754.

Zitzler, E., Laumanns, M., e Thiele. L. (2001). SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm” *Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Gloria Strasse 35*.