

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO RAMOS ZEMERO

**METODOLOGIA PARA O PROJETO PRELIMINAR DE EDIFÍCIOS UTILIZANDO
OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO BASEADA NA SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO**

TD: 31/2019

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**METODOLOGIA PARA O PROJETO PRELIMINAR DE EDIFÍCIOS UTILIZANDO
OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO BASEADA NA SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO**

Tese de doutorado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia, subárea Fontes Renováveis, na linha de pesquisa Eficiência Energética.

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Z41m Zemeru, Bruno Ramos

METODOLOGIA PARA O PROJETO PRELIMINAR DE
EDIFÍCIOS UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO
BASEADA NA SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO / Bruno

Ramos Zemeru. — 2019. 100 f.
: il.

Orientador(a): Profª. Dra. Maria Emília de Lima Tostes

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém,
2019.

1. Projeto de edificações. 2. Estágio inicial de projeto. 3.
Otimização multiobjetivo. 4. Simulação de desempenho. I. Título.

CDD 620.0042

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**"METODOLOGIA PARA O PROJETO PRELIMINAR DE EDIFÍCIOS
UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO BASEADA NA
SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO"**

AUTOR: BRUNO RAMOS ZEMERO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 11/12/2019

BANCA EXAMINADORA:



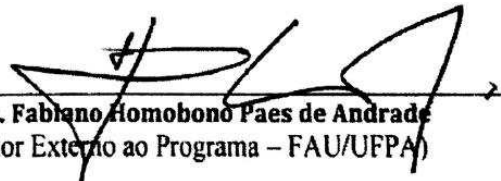
Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Orientadora – PPGE/UFPA)



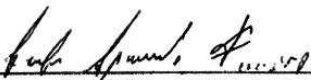
Prof.ª Dr.ª Adriana Rosa Garcez Castro
(Avaliadora Interna – PPGE/UFPA)



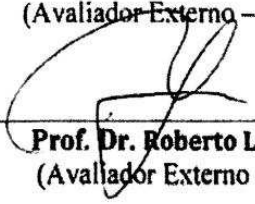
Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(Avaliador Interno – PPGE/UFPA)



Prof. Dr. Fabiano Homobono Paes de Andrade
(Avaliador Externo ao Programa – FAU/UFPA)



Prof. Dr. Carlos Aparecido Ferreira
(Avaliador Externo – UERJ)



Prof. Dr. Roberto Lamberts
(Avaliador Externo – UFSC)

VISTO:

Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGE/ITEC/UFPA)

Em memória ao meu tio Raul Ramos.

09/06/2007.
Ao meu querido
sobrinho Bruno.
que este caderno
lhe ajude a
organizar e filtrar
suas ideias, sem
jamais desistir
das suas sonhas,
que vão se tornar
realidades, com
certeza.
Seu tio Raul
com as melhores
sugestões arquitetônicas.

Dedico esta obra à minha mãe Cintia
Ramos, ao meu pai Mário Santa Helena
Jr e à professora Maria Emília Tostes.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que em nenhum momento me deixou fraquejar e que nas horas de aflição me proporcionou, com sua luz, sabedoria e conforto.

Aos meus pais, Cintia Ramos e Mario Santa Helena Jr, por todo o apoio e amor que me foram dados, além do exemplo de dignidade, responsabilidade, honestidade e caráter.

Ao meu falecido tio, arquiteto Raul Ramos, que foi a minha grande inspiração pelo seu incentivo e pela sua genialidade arquitetônica que transformou as ruas Belém.

Gratidão eterna à minha orientadora, professora Maria Emília Tostes, pela pessoa e profissional que é, por acreditar no meu trabalho e por todas as oportunidades de crescimento profissional que me foram dadas.

Aos professores do PPGEE e à banca pelas valiosas contribuições que proporcionaram embasamento a este trabalho, em especial ao professor Ubiratan Holanda Bezerra, que participou ativamente do meu trabalho dando dicas geniais em momentos determinantes, desde o início.

Ao professor Roberto Lamberts, grande referência na área de Eficiência Energética de edificações, pelas valiosas contribuições.

A toda equipe do CEAMAZON, com destaque para Thiago Mota Soares e Werbeston Douglas de Oliveira pelas dicas essenciais, desde o início do trabalho.

Agradecimento especial ao meu amigo Vitor dos Santos Batista, co-autor do meu artigo, pelo apoio nos códigos de programação, dedicação e responsabilidade.

A UFPA e CAPES por darem suporte a essa pesquisa.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

*Seja você quem for,
Seja qual for a posição social que você tenha
na vida,
A mais alta ou a mais baixa,
Tenha sempre como meta muita força,
Muita determinação e sempre faça tudo com
muito amor
E com muita fé em Deus,
Que um dia você chega lá.
De alguma maneira você chega lá.*

Ayrton Senna

RESUMO

O consumo de energia em edificações tem um grande impacto energético e ambiental em todo o mundo. O projeto arquitetônico tem um grande potencial para resolver esse problema, porque o envoltória da edificação exerce influência sobre o desempenho geral do sistema, mas essa é uma tarefa que envolve muitos objetivos e condicionantes. Nas últimas duas décadas, estudos de otimização aplicados à eficiência energética de edificações ajudaram projetistas a escolher as melhores opções de projeto. No entanto, ainda há uma falta de abordagens de otimização aplicadas ao estágio inicial de projeto, que é o estágio mais influente para a eficiência energética da edificação ao longo de todo o seu ciclo de vida. Portanto, esta tese apresenta um modelo de otimização multiobjetivo para auxiliar os projetistas no partido arquitetônico da edificação, por meio do algoritmo PAES (Pareto Archived Evolutionary Strategies) com o EnergyPlus Simulator acoplado, para avaliar as soluções. O processo de busca é executado por um matriz binária onde os componentes do matriz evoluem ao longo das gerações, juntamente com os outros componentes da edificação. A metodologia visa encontrar soluções ótimas com o menor custo construtivo associado à maior eficiência energética. No estudo de caso, foi possível simular o processo de utilização do modelo de otimização e analisar os resultados em relação a: princípios bioclimáticas, desempenho econômico, desempenho ambiental, desempenho energético, usabilidade e precisão, provando que a ferramenta serve como suporte no projeto de construções. As soluções ótimas atingiram uma considerável economia de energia e emissões operacionais de CO₂ operacionais em relação ao típico, bem como retorno do investimento a curto prazo nos quatro diferentes climas.

Palavras-chave: Projeto de edificações, Estágio inicial de projeto, Otimização multiobjetivo, Simulação de desempenho.

ABSTRACT

Buildings energy consumption has a great energetic and environmental impact worldwide. The architectural design has great potential to solve this problem because the building envoltória exerts influence on the overall system performance, but this is a task that involves many objectives and constraints. In the last two decades, optimization studies applied to energy efficiency of buildings have helped specialists to choose the best design options. However, there is still a lack of optimization approaches applied to the early design stage, which is the most influential stage for the building energy efficiency over its entire life cycle. Therefore, this article presents a multiobjective optimization model to assist designers in the preliminary building design, by means of the PAES (Pareto Archived Evolutionary Strategies) algorithm with the EnergyPlus Simulator coupled, to evaluate the solutions. The search process is executed by a binary array where the array components evolve over the generations, together with the other building components. The methodology aims to find optimal solutions with the lowest constructive cost associated with greater energy efficiency. In the case study, it was possible to simulate the process of using the optimization model and analyse the results in relation to: bioclimatic principles, economic performance, environmental performance, energy performance, usability and accuracy, proving that the tool serves as support in building design. Optimal solutions achieved energy savings and operational CO₂ emissions over typical standards, as well as short-term return on investment in four different types of weather.

Keywords: Building design, Early design stage, Multiobjective optimization, Performance simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo de partido arquitetônico	13
Figura 2 - A tendência de estudos de otimização na ciência da edificação.....	14
Figura 3 - Relação da otimização com a Eficiência energética de edificações	16
Figura 4 - Otimização incorporada no processo de projeto de edificações	17
Figura 5 - O elo de acoplamento aplicado à otimização baseada em simulação.....	19
Figura 6 - Função Unimodal versus Multimodal	24
Figura 7 - Ciclo do Algoritmo Evolutivo	25
Figura 8 - Tomada de decisão multiobjectivo através da Fronteira de Pareto	31
Figura 9 - Resumo gráfico sobre otimização na concepção de edificações	33
Figura 10 - Modelo de otimização proposto.....	44
Figura 11 - Hipótese de utilização do Algoritmo NSGA-II versus PAES neste problema	49
Figura 12 - Fronteira de Pareto - Clima frio.....	57
Figura 13 - Fronteira de Pareto - Clima levemente frio	58
Figura 14 - Fronteira de Pareto - Clima levemente quente.....	60
Figura 15 - Fronteira de Pareto - Clima quente	61
Figura 16 - Frentes Pareto sobrepostas de 4 climas analisados	63
Figura 17 - Ciclo de vida da edificação	64
Figura 18 - Desempenho energético das soluções ótimas versus benchmark	68
Figura 19 - Convergência apresentando a evolução das soluções no tempo frio	69
Figura 20 - Desempenho do modelo proposto versus algoritmo de força bruta (acurácia)	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fases de otimização baseados em simulação de edificações.	20
Tabela 2 - Atributos de métodos algorítmicos	23
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos algoritmos evolutivos multiobjetivo	27
Tabela 4 - Entradas do usuário correspondentes ao exemplo contido na Figura 1	43
Tabela 5 - Descrição das variáveis de busca e objetos EnergyPlus correspondentes.....	45
Tabela 6 - Exemplo de configuração de módulo geométrico	46
Tabela 7 - Alternativas construtivas de componentes do módulo geométrico	47
Tabela 8 - Configurações fixas do módulo geométrico.....	54
Tabela 9 - Entradas do usuário do estudo de caso	55
Tabela 10 - Características das soluções ótimas - Clima frio.....	57
Tabela 11 - Características das soluções ótimas - Clima levemente frio	59
Tabela 12 - Características das soluções ótimas - Clima levemente quente	60
Tabela 13 - Características das soluções ótimas - Clima quente.....	62
Tabela 14 - Desempenho das soluções ótimas 1 (SO 1) versus edificação de referência	66

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BES - Building Simulation Energy
CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
COP - Coeficiente de Performance
FFGA - Fonseca and Fleming's multiobjective EA
GA - Genetic Algorithm
HVAC - Heating, ventilation, and air conditioning
HLGA - Hajela and Lin's weighted-sum based approach
ISO - International Organization for Standardization
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
LCC - Life Cycle Cost
LCA - Life Cycle Analysis
LEED - Leadership in Energy and Environmental Design
MMD - MetaModel Development
NBR - Normas Brasileiras
NPGA - Niched Pareto Genetic Algorithm
NSGA - Deb and Srinivas's Nondominated Sorting Genetic Algorithm
NSGA2 - Non Sorting Genetic Algorithm 2
PAES - Pareto Archived Evolution Strategy
PESA - Pareto envelop-based Selection Algorithm
SPEA2 - Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2
SOEA - Single-objective evolutionary algorithm using weighted-sum aggregation
SPEA - Strength Pareto Evolutionary Algorithm
TCPO - Tabelas de Composição de Preços para Orçamento
TIR - Taxa Interna de Retorno
TMA - Taxa Mínima de Atratividade
ROI - Return on investment
VAV - Volume de Ar Variável
VEGA - Vector Evaluated Genetic Algorithm
VPL - Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

RESUMO.....	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE SIGLAS	V
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	6
1.1 Apresentação do problema.....	6
1.2 Hipóteses de solução	8
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivos Geral	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	9
1.4 Justificativa	9
1.5 Estrutura da tese	10
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1 Otimização aplicada a projetos de alto desempenho	12
2.2 Otimização baseada em simulação	17
2.3 Algoritmos de otimização	20
2.4 Escolha do algoritmo apropriado	28
2.5 Otimização multiobjetivo	29
2.6 Pesquisas sobre otimização para projeto de edificações.....	31
2.7 Análise das vantagens e limitações das pesquisas mais importantes.....	34
2.8 Análise crítica sobre a revisão da literatura	37
2.9 Inovação desta abordagem em relação à literatura	39
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	41
3.1 Formulação do problema de otimização	41
3.2 Funções objetivo.....	44
3.3 Variáveis de busca.....	45
3.4 Módulo Geométrico	46
3.5 Modelo de Otimização	48
3.5.1 Modelo para criar o arquivo idf do EnergyPlus	49
3.5.2 Criando a solução inicial (atual)	50
3.5.3 Avaliação de soluções.....	50
3.5.4 Mutação da solução atual	51
3.5.5 Processo de Arquivamento	52

CAPÍTULO 4 - VALIDAÇÃO	54
4.1 Descrição do estudo de caso	54
4.2 Resultados da otimização para os 4 climas versus princípios bioclimáticos.....	55
4.3 Tomada de decisão sobre qual solução ótima escolher para os 4 climas	63
4.4 Desempenho energético e econômico das soluções ótimas versus edifício de referência	64
4.5 Desempenho energético das soluções ótimas versus <i>benchmark</i> brasileiro	67
4.6 Modelo de otimização versus usabilidade.....	68
4.7 Modelo de otimização versus precisão	69
4.8 Discussão dos resultados.....	70
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	73
REFERENCIAS	75
APÊNDICE	83
APÊNDICE A - COMPOSIÇÃO DE PREÇO UNITÁRIO DOS ELEMENTOS	83
APÊNDICE B - ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO CONCEITUADO	86
ANEXOS	87
ANEXO A - PRODUTO DA FASE INICIAL DE PROJETO DE EDIFICAÇÕES.....	87
ANEXO B - SIMULAÇÃO COMO AUXÍLIO NAS FASES DE PROJETO.....	88
ANEXO C - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SIMULADOR ENERGYPLUS.....	89
ANEXO D - PESQUISAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS A EDIFICAÇÕES	91
ANEXO F - SOFTWARES DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS A EDIFICAÇÕES.....	92

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Este Capítulo apresenta a descrição do problema das edificações de baixo desempenho, hipóteses de solução a partir de um modelo de otimização baseado em simulação para auxiliar projetistas no partido arquitetônico, objetivos, justificativa e estrutura da tese.

1.1 Apresentação do problema

O desenvolvimento sustentável é um dos maiores desafios que o mundo atual e futuro enfrentam para manter a sobrevivência do ser humano. Sendo a construção uma das atividades que mais prejudica a saúde planetária no consumo de recursos naturais, energia e geração de resíduos, é essencial que se desenvolvam políticas, normas e metodologias para controlar e reduzir estes fatores neste setor (Andrade, 2013). A construção civil tem um importante papel por ser um dos setores que mais impactam o meio ambiente, responsável por 40% do consumo de energia mundial e, ainda, 50% das emissões de CO₂. No Brasil, de acordo com dados da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), as edificações consomem 42% de toda a energia gerada. O uso residencial corresponde por 23% do total produzido no país, enquanto os setores comercial e público respondem por 11% e 8%, respectivamente.

O aumento da sustentabilidade do setor depende de soluções em todos os níveis, articuladas dentro de uma visão sistêmica. As decisões de projeto, como localização das obras, a definição do produto a ser construído, o partido arquitetônico¹ e a especificação de materiais e componentes, afetam diretamente o consumo de recursos naturais e de energia, bem como a otimização ou não da execução e o efeito global no seu entorno (corte, aterro, inundações, ventilação, insolação), sem falar nos impactos estéticos e urbanísticos mais amplos. Os insumos empregados são, por si só, grandes consumidores de recursos naturais e de energia (Agopyan, et al., 2011). Existem muitos incentivos regulamentares e de certificação para tornar os edificações mais sustentáveis, incluindo os regulamentos nacionais de construção, programas de etiquetagem de edificações, certificações ambientais e políticas de planejamento local (Pacheco, et al., 2014).

A Eficiência Energética na Arquitetura pode ser entendida como um atributo inerente à edificação representante de seu potencial em possibilitar conforto térmico, visual e acústico aos

¹ Partido arquitetônico é o ponto de partida de um projeto, em forma de desenho esquemático, que leva em consideração um conjunto de condicionantes para alcançar objetivos do programa de necessidades da edificação, relativas ao desempenho, função e tecnologia.

usuários com baixo consumo de energia. Portanto, uma edificação é mais eficiente energeticamente que outra quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia. As decisões de projeto influenciam fortemente o desempenho térmico, visual e energético da edificação. O arquiteto deve considerar a adequação do seu projeto ao clima local utilizando diversas estratégias de uso da luz natural, resfriamento e aquecimento passivo dos ambientes (Lamberts, et al., 2014).

Para alcançar bons níveis de desempenho energético nas edificações, é essencial adotar estratégias arquitetônicas passivas de acordo com o clima em análise, a fim de aproveitar os recursos naturais do Sol e vento para economizar no consumo de Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado (HVAC) e iluminação artificial. Dentro das estratégias de projeto passivo, algumas podem ser destacados como: a orientação da edificação, a forma da edificação, mecanismos de aquecimento e resfriamento passivos, materiais construtivos, sombreamento e vidros. As variáveis climáticas da região devem ser sempre levadas em consideração, pois influenciam na troca de calor entre a edificação e o ambiente externo, alterando assim a performance de energia e conforto (Pacheco, et al., 2012) e (Lamberts, et al., 2014).

A fase de concepção de uma edificação é o melhor momento para integrar estratégias sustentáveis. Quando estes mecanismos são colocados em ação no início da fase de construção, isto reduz os custos de implementação em comparação com sua instalação em fases subsequentes de construção. O projeto sustentável reduz os custos de energia na fase de operação da edificação por causa de seu menor consumo de energia, sem a necessidade de um alto investimento inicial. Também há menos emissões de CO₂ na atmosfera, isso beneficia também a sociedade (Wang, et al., 2006). A envoltória determina as condições climáticas internas e, portanto, a demanda de energia adicional para aquecimento e resfriamento. As ações sobre os elementos que compõem a envoltória da edificação podem ter um impacto positivo na necessidade de energia e ter um efeito negativo sobre os outros. Consequentemente, é necessário avaliar o desempenho da edificação como um todo (Pacheco, et al., 2014).

Além dos objetivos sustentáveis, muitos outros objetivos e condicionantes influem na tomada de decisão na etapa de projeto, entre as quais podem se destacar: Segurança (segurança estrutural, segurança contra o fogo, segurança no uso e na operação); Habitabilidade (estanqueidade, conforto térmico, conforto acústico, conforto lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico); Sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade, impacto ambiental). O arquiteto tem sempre a missão de aliar forma, função, desempenho e sustentabilidade para resolver da forma mais eficiente e econômica o programa de necessidades estabelecido pelo cliente e pelas normas de

desempenho, diante das condicionantes legais, climáticas e financeiras inerentes de cada projeto (Malard, 2006).

Sem a seleção e conseguinte restrição das premissas, o raciocínio dedutivo é impossível ao projetista. Não se pode, normalmente, construir qualquer raciocínio dedutivo a partir de premissas infinitas, mas somente sobre um número limitado delas. Sendo o problema arquitetônico um problema do mundo real, seus dados iniciais de projeto são virtualmente infinitos. Portanto, se um projetista se puser a analisar indefinidamente todos os fatores que condicionam o seu projeto, sejam seus aspectos técnicos, legais, financeiros ou de qualquer outra natureza, é provável que sua análise possa sempre ser ampliada e, ainda assim, ele jamais será capaz de conceber uma análise completa. (Hearn, 2006).

Na revisão (Soares, et al., 2017) os autores apresentam as lacunas na área de Conforto Ambiental e Eficiência Energética e destacam o “Design Generativo” (desenho gerado através de regras ou Algoritmos) como o meio mais promissor para resolver problemas de Arquitetura Bioclimático da atualidade. Isso porque este método consegue encontrar soluções de projeto otimizadas, a partir de um conjunto de leis físicas predefinidas, ou seja, balanço de energia, balanço de massa, condutividade, transferência de calor e assim por diante. No entanto, há uma escassez desses modelos voltados para a fase inicial de projeto e os poucos existentes ainda possuem muitas limitações na maneira como tratam as condicionantes e objetivos conflitantes de projeto, o que demanda a resolução desta importante lacuna.

1.2 Hipóteses de solução

Criar um modelo de otimização multiobjetivo baseado na simulação de desempenho para a fase de partido arquitetônico pode:

- Proporcionar Eficiência Energética e Sustentabilidade econômica e ambiental;
- Reduzir o espaço de busca no processo de projeto;
- Reduzir o tempo de projeto;
- Agregar valor para investidores e consumidores finais no mundo inteiro;
- Otimizar o custo construtivo versus consumo de energia/emissão operacional de CO₂;
- Gerar economia em todo o ciclo de vida (projeto, construção, operação, manutenção).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Geral

- Criar um modelo de otimização multiobjetivo baseado em simulação de desempenho para busca de soluções ideais de partido arquitetônico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar o processo de busca das melhores soluções de partido arquitetônico atendendo os principais objetivos de desempenho e condicionantes locais, característicos desta fase;
- Utilizar um Algoritmo de otimização multiobjetivo acoplando um simulador de desempenho para avaliação do rol de soluções candidatas, visando o encontro da solução ótima de partido arquitetônico.

1.4 Justificativa

Hoje, a arquitetura sustentável está em alta pelo grande impacto energético, econômico e ambiental que as edificações causam. A demanda por projetos que promovam Conforto Ambiental, saúde e eficiência energética são metas de desempenho normativos indispensáveis. As edificações tem o maior potencial e menor custo para a redução de energia e emissão de CO₂. O projeto adequado de orientação, estrutura, envoltória e materiais de construção de um edificação é importante para controlar as cargas térmicas do ganho de calor solar (reduz em média 35% de carga térmica), reduzindo assim o tamanho da HVAC, o que aprimora a viabilidade das tecnologias de resfriamento solar. Recursos passivos solares podem adicionar de 0 a 15% nos custos de projeto e construção. No entanto, pagar esse custo inicial em troca é uma economia de energia de longa duração (Chan, et al., 2010).

No entanto o projeto de edificações é um processo complexo no qual o projetista toma decisões sobre os diferentes sistemas relacionados com a edificação (ambiental, análise de custos, estruturais, atividades, entre outras). As opções de projeto são reduzidas através de uma sucessão de etapas, que envolvem análise, síntese e avaliação. Os diferentes sistemas de construção estão inter-relacionados: cada um define restrições em um ou mais dos outros. Além disso, cada sistema pode consistir em vários subsistemas; O projeto ambiental inclui, por exemplo, os subsistemas térmicos, visuais e auditivos. (Machairas, et al., 2014).

O estágio de projeto da edificação é o melhor momento para implementar estratégias de projeto passivo, porque neste estágio as variáveis com maior impacto na demanda final de energia são definidas como: orientação, forma e relação entre a superfície externa da edificação e o volume (Pacheco, et al., 2012). No entanto, o estágio inicial do projeto é bastante complicado, pois abrange objetivos de desempenho conflitantes (layout, energia, custo, conforto, etc), bem como várias condicionantes, como clima e limites para ocupação do solo, topografia, entorno imediato, etc. As possibilidades de projeto são infinitas e exigem uma análise exaustiva para chegar a uma boa solução (Sadineni, et al., 2011).

Atualmente, é usual o acoplamento de um simulador de desempenho a um algoritmo de otimização pois o modelo simulado serve para avaliar o rol de soluções de projeto e selecionar a que possui o melhor desempenho, considerando um ou múltiplos objetivos de projeto, conflitantes ou não. Essas vantagens tornam a otimização multiobjetivo baseada em simulação o “estado da arte” do projeto de edificação de alto desempenho (Nguyen, et al., 2014). Os procedimentos de otimização não substituem a natureza subjetiva e criativa fundamental do projetista, mas sim os auxiliam a encontrar soluções de projeto e, assim, contribuir para a preservação da prática de baixo consumo de energia nos edificações (Machairas, et al., 2014).

Diante desta complexa e importante tarefa, esta tese utiliza um algoritmo de otimização multiobjetivo com um simulador de desempenho acoplado para encontrar as melhores soluções de partido arquitetônico de edificações. Seu ineditismo consiste na formulação do problema de otimização, elaborado para buscar a morfologia e o melhor conjunto de elementos para atender as metas de desempenho e condicionantes locais característicos da fase de estudo preliminar de projeto, que é a fase que exerce maior impacto no desempenho porque suas decisões influenciam no impacto energético, econômico e ambiental em toda a fase de operação do edifício.

Segundo (Chan, et al., 2010) o formato da edificação afeta a energia solar que recebe, assim como seu consumo total de energia. A radiação que chega a um edificação pode aumentar os requisitos de energia para resfriamento em até 25%. Combinando forma e orientação, é possível obter benefícios que podem reduzir 36% da energia do HVAC; estas economias associadas às demais variáveis do partido arquitetônico (materiais, sombreamento, posição e quantidade das janelas) podem atingir um ganho de até 50% (Chan, et al., 2010). Portanto, a abordagem tem um grande potencial para promover a Eficiência Energética.

1.5 Estrutura da tese

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Este Capítulo apresenta a descrição do problema das edificações de baixo desempenho, hipóteses de solução a partir de um modelo de otimização baseado em simulação para auxiliar projetistas no partido arquitetônico, objetivos, justificativa e estrutura da tese.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta técnicas de otimização para auxílio no projeto de edificações de alto desempenho, que incluem: otimização baseada em simulação termo energética, otimização multiobjetivo, algoritmos, trabalhos relacionados e inovação desta abordagem em relação à literatura.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado um modelo de otimização multiobjetivo baseado em simulação para auxiliar os profissionais de projeto na definição da solução ótima na fase de estudo preliminar de projeto de edificações, visando o desempenho sustentável de múltiplos objetivos.

CAPÍTULO 4 – APLICAÇÃO DO MÉTODO

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso igual em quatro regiões brasileiras com climas distintos, a fim de testar a metodologia. Os resultados foram gerados considerando diversos critérios para validar o método proposto.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta a conclusão sobre a tese, sua contribuição para a ciência da otimização de edificações e para a indústria de projeto de engenharia civil, ressaltando sua importância para o desenvolvimento sustentável a nível mundial.

APÊNDICE A - COMPOSIÇÃO DE PREÇO UNITÁRIO DOS ELEMENTOS

APÊNDICE B - ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO CONCEITUADO

ANEXO A - PRODUTO DA FASE INICIAL DE PROJETO DE EDIFICAÇÕES

ANEXO B - SIMULAÇÃO COMO AUXÍLIO NAS FASES DE PROJETO

ANEXO C - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SIMULADOR ENERGYPLUS

ANEXO D - PESQUISAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS A EDIFICAÇÕES

ANEXO F - SOFTWARES DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS A EDIFICAÇÕES

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta técnicas de otimização para auxílio no projeto de edificações de alto desempenho, que incluem: otimização baseada em simulação termo energética, otimização multiobjetivo, algoritmos, trabalhos relacionados e inovação desta abordagem em relação à literatura.

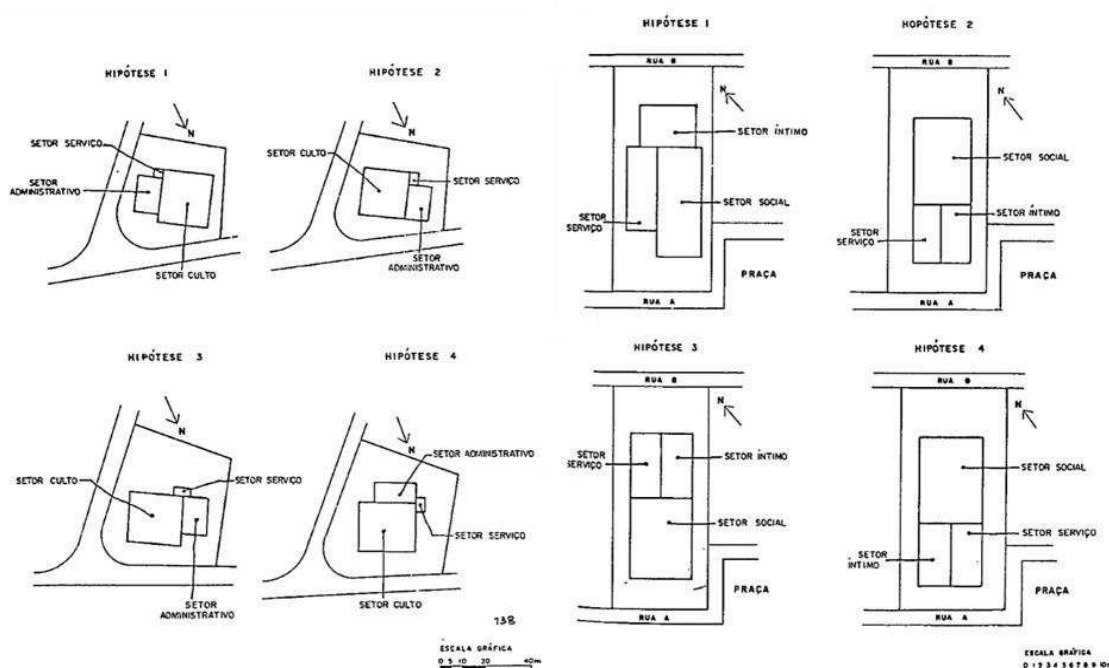
2.1 Otimização aplicada a projetos de alto desempenho

A literatura caracteriza o projeto como um sistema que deverá ter uma adequada inter-relação com seu ambiente ou contexto suporte. Ainda hoje se discute qual seria a solução adequada para a inter-relação das decisões econômicas com as técnico-arquitetônicas. A conveniência depende dos custos mas também está relacionada com aspectos (ou validações) sociológicas ou higiênicas (Mascaró, 2010). Estudos do processo criativo indicam pelo menos cinco tipos de heurísticas aplicadas na solução de projetos: Analogias antropométricas, Analogias literais, Relações ambientais, Tipologias e Linguagens formais (Rowe, 1992), (Lawson, 1997) e (Hearn, 2003).

Por meio do melhoramento de um grande número de condicionantes e requisitos conflitantes, o processo de projeto evolui em busca da “solução ideal”. Segundo a literatura e normas de desempenho, o projeto arquitetônico visa uma solução que satisfaça objetivos como desempenho operacional eficiente, custo aceitável, usabilidade, durabilidade, conforto, e restrições para não causar sequelas ou efeitos colaterais internos ou externos ao projeto, como colapso estrutural, insalubridade, custo operacional excessivo, entre outras. A fase inicial de projeto é, sem dúvida, a etapa mais crítica, pois representa a síntese morfológica do programa de necessidades; como vimos, é também a que representa o maior impacto na sustentabilidade.

A Figura 1 apresenta soluções alternativas de partido arquitetônico que caracteriza a fase de Estudo de viabilidade do empreendimento, onde o projetista realiza o Partido Arquitetônico visando atender as expectativas do cliente e dos objetivos de desempenho. Observa-se a complexidade em selecionar a solução de melhor desempenho em meio a infinitas possibilidades; além disso observa-se também que cada projeto demanda um estudo único porque cada local possui condicionantes diferentes mediante como a ocupação do solo (reco, afastamentos, coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação, taxa de permeabilidade e gabarito de altura), clima, entorno e limitação financeira do investidor. O Anexo A apresenta de forma o produto de um partido arquitetônico de edificações.

Figura 1 - Esquema representativo de partido arquitetônico

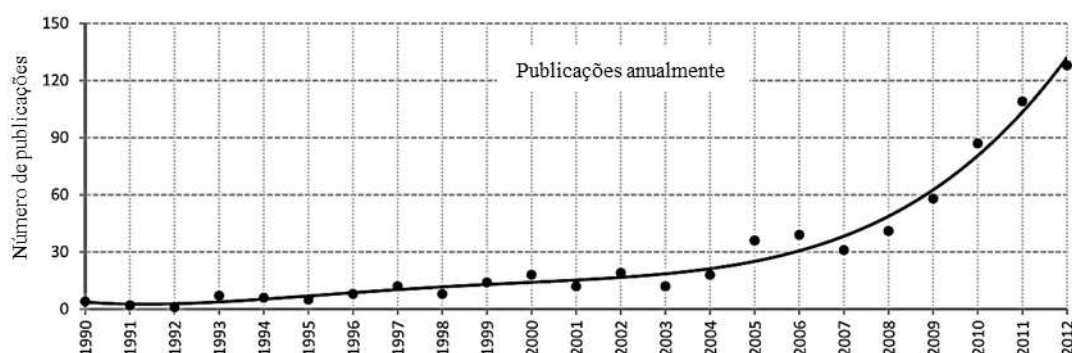


Fonte: (Neves, 1989)

Para determinar a morfologia da edificação de forma rápida e eficiente em meio às inúmeras condicionantes e objetivos do programa de necessidades arquitetônico, pesquisas no campo da ciência da otimização realizadas a partir da última década demonstram ser uma alternativa promissora para a problemática de definição da forma arquitetônica. Estas pesquisas recorrem à metaheurísticas² que automatizam o processo de análise, síntese, previsão, avaliação e decisão, características do processo de projeto arquitetônico. A Figura 2 apresenta a tendência dos estudos de otimização internacionais (indexadas por SciVerseScopus da Elsevier) no domínio da ciência das edificações nas duas últimas décadas. Pode-se observar que o número de trabalhos de otimização tem aumentado acentuadamente desde o ano de 2005. Isso demonstra um grande interesse em técnicas de otimização entre as comunidades de pesquisa sobre edificações (Nguyen, et al., 2014).

² Metaheurística é um método heurístico para resolver de forma genérica problemas de otimização (normalmente da área de otimização combinatória).

Figura 2 - A tendência de estudos de otimização na ciência da edificação



Fonte: (Nguyen, et al., 2014)

Em matemática, estatísticas e muitas outras ciências, otimização matemática é o processo de encontrar a melhor solução para um problema a partir de um conjunto de alternativas disponíveis. "A teoria da otimização engloba o estudo quantitativo de ótimos e métodos para encontrá-los" (Goldberg, 1989). A equação 1 apresenta uma descrição matemática geral do problema de otimização (Haupt, et al., 2004):

$$\text{Minimise } F(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$G(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0$$

$$X_i \in S_i$$

Há uma série de funções objetivo F , que, por convenção são para serem minimizadas. Há um certo número de limitações funcionais G , que, por convenção deve ser maior ou igual a zero. Cada variável de projeto versus i é restrito a certos valores S_i , definido quer como valores discretos ou por valores de limite. Objetivos e condicionantes podem ser intercambiáveis, dependendo de como o problema é formulado (Machairas, et al., 2014).

Métodos de otimização podem ser aplicados a uma série de diferentes problemas de projeto de edificação, tais como a envoltória, orientação, projeto de fachada, conforto térmico, iluminação natural, análise do ciclo de vida, análise de projeto estrutural, energia e custo construtivo. Para lidar com inúmeros tipos de problemas de otimização, um grande número de métodos de otimização foram desenvolvidos (Sönmez, 2018). Os algoritmos de otimização podem ser geralmente classificados como métodos locais ou globais, métodos heurísticos ou metaheurísticos, métodos determinísticos ou estocásticos, métodos baseados em derivados ou sem derivado, métodos de trajetória ou baseados em população, métodos bioinspirados ou não

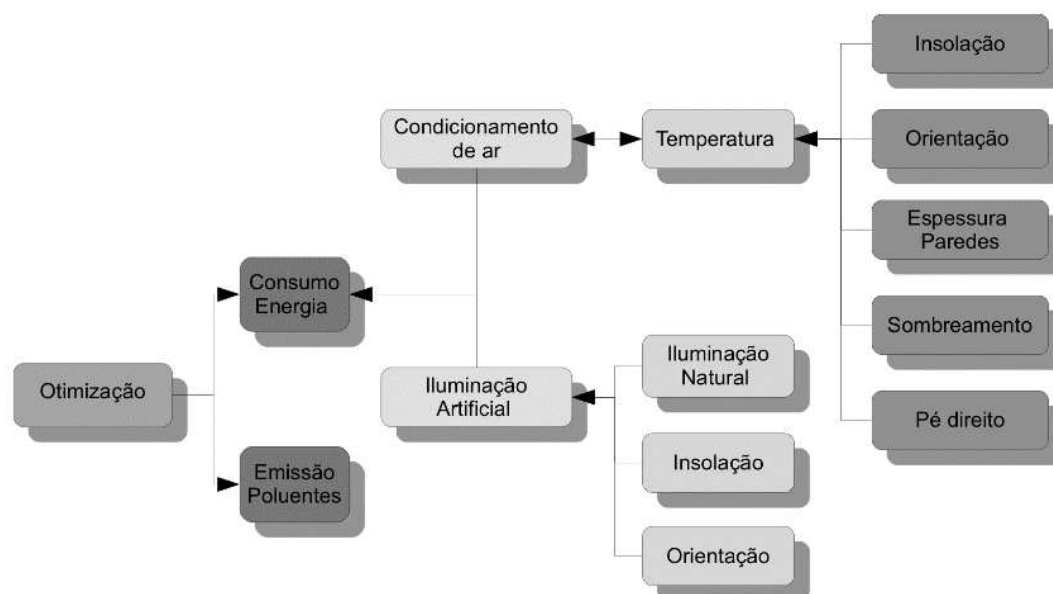
bioinspirados, algoritmos de um objetivo ou com vários objetivos, entre outros (Machairas, et al., 2014).

Dentre as metaheurísticas, destacam-se os algoritmos evolutivos que buscam tratar estruturas de objetos abstratos de uma população, como, por exemplo, variáveis de um problema de otimização, dos quais são manipulados por operadores inspirados na evolução biológica, que objetivam a busca para a solução de um problema, estes operadores são comumente chamados de operadores genéticos. Tais algoritmos podem trabalhar em problemas, sem que exista um conhecimento explícito, isto é, que podem tratar-se de paradigmas, como é o caso do problema de projeto arquitetônico.

Em geral, os construtores procuram minimizar o custo inicial da edificação ou o custo operacional, enquanto em alguns casos, o custo do ciclo de vida da edificação e o impacto ambiental também são usados (Evins, 2013). A otimização pode ser classificada como restrita ou problemas sem restrições com base na presença de restrições que definem o conjunto de soluções viáveis dentro de uma maior pesquisa de espaço. O número de opções pode ser restringido pelos códigos de construção locais e/ou o canteiro de obras, tendo em vista que o custo do material e a experiência dos empreiteiros dependem do local. Em contraste com as restrições do mundo real, a literatura apresenta uma maior diversidade de soluções. Portanto, é evidente que a seleção das variáveis de projeto apropriadas e função objetivo desempenham um papel crucial em um estudo de otimização (Machairas, et al., 2014). Lidar com um problema sem restrições provavelmente será muito mais fácil do que um problema limitado, mas a maioria dos problemas de otimização são restritos.

A Figura 3 apresenta a relação da otimização com a Eficiência energética de edificações. As variáveis de um problema de otimização de projeto geralmente descrevem a construção e a geometria da edificação. As opções de projeto de edificação incluem geometria e construção, enquanto as aplicações de Retrofit usam apenas as opções de construção. Exemplos de variáveis de projeto típicas são a orientação e a forma de um edificação, as dimensões da parede, a espessura da parede/telhado e os materiais, o tipo de vidro, a relação de tamanho entre a janela e a parede, a massa térmica e a estanqueidade do ar, a intensidade da luz, o dimensionamento do sistema Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (HVAC) e suas opções de sombreamento (Nielsen, et al., 2016). Estas opções de projeto são definidas de acordo com o clima, a fim de atingir o máximo desempenho ambiental com o mínimo de consumo energético.

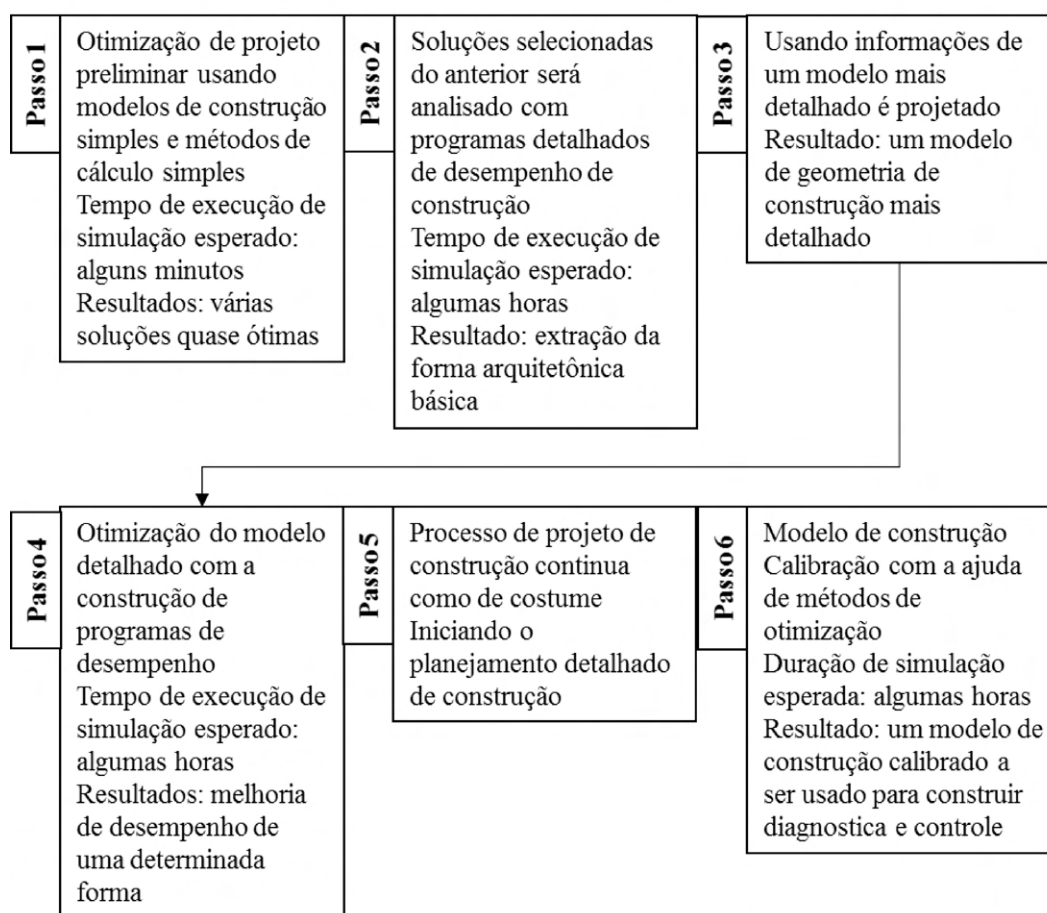
Figura 3 - Relação da otimização com a Eficiência energética de edificações



Fonte: Arquivo Pessoal

O Anexo B desta tese apresenta as fases de um projeto arquitetônico auxiliado por simulação extraído da tese de (Dingwall, 2012). As 2 primeiras colunas marcadas em cinza representam a fase de partido arquitetônico, foco desta tese. Pode-se observar os inúmeros benefícios ao incorporar a simulação de termo energética no problema de otimização da fase inicial de projeto. A revisão de (Machairas, et al., 2014) explica como cada uma destas fases de projeto é resolvida pela otimização. O autor ressalta que futuros fluxos de projeto de edificação deverão incluir tais procedimentos de otimização com mais frequência. A proposta de um futuro processo de concepção da edificação que incorpora técnicas de otimização é apresentado na Figura 4. É possível observar que a otimização é aplicável a todas as etapas de projeto, mas não substitui por completo o trabalho do projetista, que permanece incumbido de detalhar o modelo preliminar otimizado para realizar a otimização novamente em uma fase mais avançada de projeto, até chegar no nível de projeto executivo.

Figura 4 - Otimização incorporada no processo de projeto de edificações



Fonte: (Machairas, et al., 2014)

2.2 Otimização baseada em simulação

O cálculo da função objetivo pode ser realizado através do acoplamento de simuladores ao algoritmo de otimização para tirar proveito de todos os benefícios apresentados no Anexo B. Uma das principais vantagens deste procedimento é a grande diversidade de dados de saída (equações embutidas no simulador) que podem ser obtidos contemplando aspectos físicos, ambientais e financeiros, entre outros, mais realistas e relevantes para o projeto de edificação, tornando-os uma ferramenta versátil para resolver diferentes tipos de problemas, onde técnicas de otimização numéricas não podem alcançar (Nguyen, et al., 2014), (Santos, et al., 2017), (Nisztuk, et al., 2017), (Kumar, 2016) e (Coakley, et al., 2014).

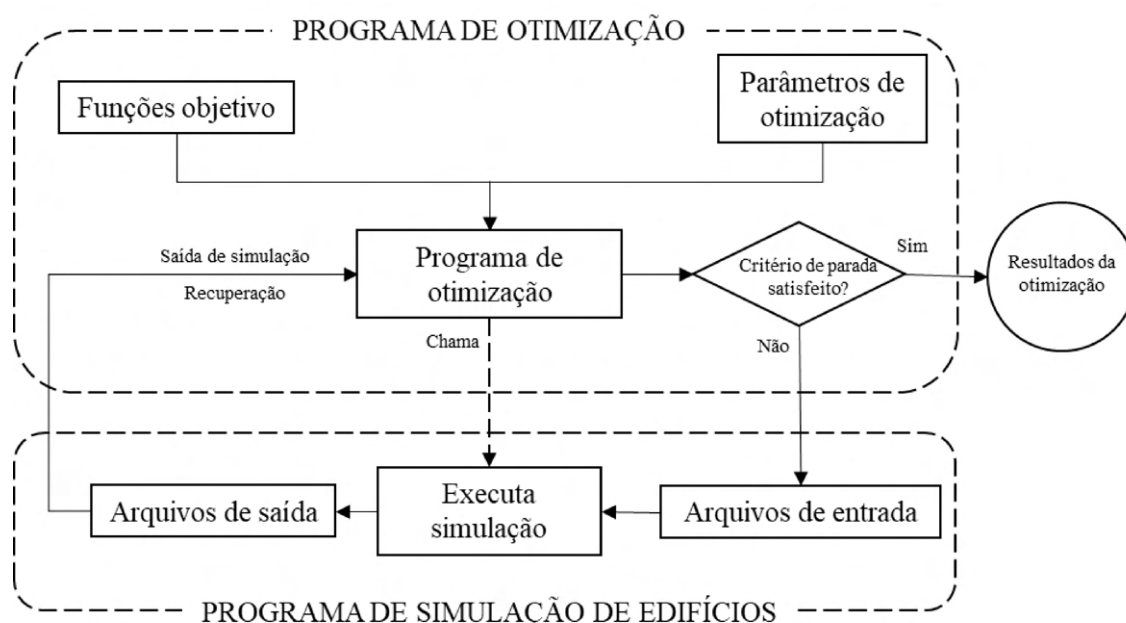
A Otimização baseada em simulação termo energética é capaz de trabalhar com modelos de energia geométricos, o que é difícil de fazer pela simulação numérica, embora o tempo computacional seja alto em comparação com os procedimentos de otimização numérica (Tian, et al., 2018). Portanto, a maneira de usá-los de forma eficiente é a escolha adequada do algoritmo de otimização, de acordo com o problema a ser resolvido (Nguyen, et al., 2014). A

simulação de edificação inteira não é linear e inclui descontinuidades nos resultados. Os algoritmos disponíveis para tais problemas não podem garantir que a verdadeira solução ideal seja encontrada (Machairas, et al., 2014).

O software mais usado para este fim é o EnergyPlus (dinâmica de funcionamento do software detalhado no Anexo C), que simula a performance termo energética dos edificações por meio de equações de transferência de calor, levando em consideração os parâmetros inseridos no modelo geométrico (Tian, et al., 2018). Estas equações servem como função objetivo para problemas de otimização e os parâmetros do modelo geométrico servem como variáveis de busca, transformando este simulador em um poderoso recurso que pode ser acoplado com algoritmos de otimização para auxílio na tomada de decisão dessas variáveis de projeto visando diversos objetivos de sustentabilidade (Nguyen, et al., 2014), (Kumar, 2016) e (Coakley, et al., 2014).

Em um estudo de otimização de edificação convencional, este processo é usualmente automatizado pelo acoplamento entre um programa de simulação e criação de um motor de otimização que pode consistir de um ou vários algoritmos ou estratégias de otimização (Attia, 2012). A estratégia mais comum da Otimização baseada em simulação termo energética são resumidos e apresentados na Figura 5, onde é estabelecido um ciclo envolvendo o algoritmo de otimização e o simulador acoplado a este algoritmo, que tem o objetivo de avaliar os indivíduos ao longo das gerações. Este ciclo só para quando o critério de parada é satisfeito, que pode ser o desempenho pretendido ou um número de gerações suficiente para chegar próximo ao ótimo global, quando o algoritmo não é determinístico. Diferente de uma equação fitness padrão, na otimização baseada em simulação o que determina a aptidão das soluções é simulação de desempenho das soluções candidatas, que em uma equação fitness padrão seriam as variáveis da equação.

Figura 5 - O elo de acoplamento aplicado à otimização baseada em simulação



Fonte: (Nguyen, et al., 2014)

Em (Nguyen, et al., 2014) é realizada uma comparação das ferramentas de otimização existentes usando os objetivos e sub objetivos discutidos anteriormente. Os resultados da comparação indicam que as ferramentas de otimização possuem boa integridade de dados, interoperabilidade e usabilidade. Estas ferramentas tem uma poderosa capacidade de otimização, mas são difíceis de usar e nenhuma dessas ferramentas pode satisfazer todas as necessidades dos projetistas. Este comparativo é apresentado no Anexo F desta tese.

Devido à variedade de métodos aplicados a problemas de otimização, um processo de otimização pode ser subdividido em etapas e fases menores de diferentes maneiras. Os autores (Evins, et al., 2012) realizaram a otimização através de 4 etapas: triagem variável, otimização inicial, otimização detalhada e resultados decorrentes (regras de projeto inovadores). Outros esquemas de otimização com mais do que um passo foram utilizados em (Lee, 2007) e (Hamdy, et al., 2011). A revisão de (Nguyen, et al., 2014) subdivide globalmente um processo de otimização genérico em 3 fases, incluindo uma fase de pré-processamento, uma fase de otimização e uma fase de pós-processamento. A Tabela 1 apresenta estas três fases de otimização e tarefas potenciais em cada fase.

Tabela 1 - Fases de otimização baseados em simulação de edificações.

Fases	Subfases
Pré-processamento	Formulação do problema de otimização:
	Criação do Modelo computacional
	Definição de funções e restrições objetivas
	Seleção e definição de variáveis independentes (projeto) e restrições
	Seleção de um algoritmo de otimização apropriado e suas configurações para o problema
	Acoplamento do algoritmo de otimização e do programa de simulação de edificação
	(Opcional) Rastreo para variáveis sem importância, utilizando análise de sensibilidade, a fim de reduzir o espaço de busca e aumentar a eficiência da otimização, por exemplo
	(Opcional) Criação de um modelo de substituição (um modelo simplificado do modelo de simulação) para reduzir o custo computacional da otimização, por exemplo
Otimização em execução	Monitorando a convergência
	Controlando objetivo de parada
	Detecção de erros ou falhas de simulação
Pós-processamento	Interpretando resultados de otimização
	(Opcional) Verificação e comparando resultados de otimização de modelos substitutos e modelos "reais" para a confiabilidade
	(Opcional) análise de sensibilidade sobre os resultados
	Apresentação dos resultados

Fonte: (Nguyen, et al., 2014)

Segundo (Wetter, et al., 2004), a avaliação da função objetivo por um programa de simulação de edificação completa requer muito mais tempo de processamento do que o necessário para determinar os valores para a próxima iteração, por isso é importante escolher o método de otimização mais adequado ao problema em questão. Em (Machairas, et al., 2014) são apresentadas as características essenciais de uma ferramenta de otimização para uso diário em uma equipe de projeto:

- Desempenho satisfatório.
- Fornecimento de interface gráfica de usuário.
- Capacidade de estimar soluções múltiplas com desempenho semelhante.
- Capacidade de processamento paralelo.
- Operação híbrida.

2.3 Algoritmos de otimização

Para conseguir uma solução ótima para um problema (ou uma solução próxima ao ideal) com menos tempo e trabalho, o modelo de otimização computacional é geralmente "resolvido"

por métodos iterativos, que constroem sequências infinitas, de aproximações progressivamente melhores a uma "solução", ou seja, um ponto no espaço de busca que satisfaz uma condição de otimização (Evins, 2013). Diferentes técnicas de otimização podem ser estabelecidas dependendo se a função objetivo é linear ou não-linear, convexa ou não convexa, uni-modal ou multimodal, diferencial ou não diferencial, contínua ou descontínua e computacionalmente demorada. Estes resultam em linear e programação não-linear, convexa e otimização não convexa, derivado à base e métodos de otimização de derivados livres, heurísticos e otimização com métodos metaheurísticos, baseados em simulação e substituto à base de otimização. Esses algoritmos pertencem a dois grupos: os métodos de busca direta e os métodos de busca probabilística (Tresidder, 2014) e (Dingwall, 2012).

Para realizar um procedimento de otimização eficaz, é essencial escolher o algoritmo adequado para cada tipo de problema, visando resolver o mesmo problema com menor esforço (eficiência) e resolver uma maior variedade de problemas (robustez). O desempenho do algoritmo depende do tipo de problema a ser resolvido e de sua descrição matemática. Esta é a razão pela qual tantos métodos estão em uso. Esses algoritmos pertencem a um dos dois grupos a seguir. Métodos de busca direta, que buscam a solução global ideal e geralmente são aplicáveis a problemas lineares e os Métodos de busca probabilística, que buscam uma aproximação para a solução global ótima e geralmente são aplicados a problemas não-lineares (Tresidder, 2014), (Dingwall, 2012) e (Nielsen, 2002).

"Pesquisa direta" abrange métodos que comparam as soluções experimentais com os melhores encontrados, com uma estratégia baseada em resultados para determinar o próximo teste. Geralmente esses métodos são eficientes, mas podem ficar presos em ótimo local. Exemplos usados na otimização para apoio no projeto de edificações incluem:

- Padrão de busca, por exemplo, Hooke e Jeeves: cada dimensão por sua vez é testado; Quando nenhuma melhoria adicional é possível, o tamanho do passo é reduzido para metade.
- Programação linear, incluindo o Método simplex de Nelder e Mead: se a função objetiva e todas as restrições são lineares, o ótimo deve cair sobre um ponto extremo.
- Programação não-linear: uma série de extensões para permitir objetivos e restrições não-lineares (por exemplo, o método de ponto interior, que atravessa uma região viável definida por funções de barreira).

Algoritmos evolutivos são algoritmos meta-heurístico de otimização. Eles aplicam o princípio darwiniano de sobrevivência do mais apto, mantendo uma população de soluções das

quais os menos aptos são eliminados a cada geração. Os "operadores" comuns aplicados para gerar novas soluções incluem mutação (introdução de mudanças aleatórias) e cruzamento (troca de elementos de soluções diferentes). Os tipos de algoritmo evolutivo incluem:

- Algoritmos Genéticos (GA): a, estrutura de dados linear fixo (ou seja, uma lista de valores de variáveis). A aplicação mais comum para problemas multiobjetivo é NSGA-II.
- Programação Evolucionária (EP) e Programação Genética (GP): árvore-estruturas que permitem variáveis hierárquicas ou representações de funções e programas. No EP, apenas os valores das variáveis mudam; No GP a estrutura também muda.
- Adaptação da matriz de covariância - Estratégia Evolutiva (CMA-ES): novos valores de variáveis são recolhidos a partir de distribuições de probabilidades, em que as dependências são representadas por uma matriz de covariância, atualizados a cada geração.
- Evolução Diferencial (DE): valores de variáveis são perturbados pela introdução de componentes de outras boas soluções.

Algoritmos meta-heurísticos que imitam outros processos naturais incluem:

- Busca harmônica (HS): valores de variáveis são recombinados para encontrar as melhores combinações, com alguma perturbação aos valores vizinhos. Mantém-se uma população contínua de melhores soluções.
- Otimização por enxame de partículas (PSO): soluções movem-se em um espaço de busca com base na sua própria posição e na do melhor indivíduo do enxame.
- Otimização por colônia de formigas (ACO): imita o processo pelo qual formigas depositam feromônios em caminhos para encorajar outras formigas a seguir, os valores das variáveis que são muito utilizados acumulam feromônios polarizando sua seleção nas escolhas futuras.
- Simulated Annealing (SA): as soluções são perturbadas longe de suas posições atuais, e a probabilidade de reter a melhor solução é aumentada gradualmente com o tempo.

Existem muitos métodos algorítmicos diferentes para otimizar projetos de edificação. A Tabela 2 apresentada em (Evins, 2013) contempla a análise dos atributos de métodos algorítmicos como: Complexidade do problema de otimização (Restritos, Multimodais, Multiobjetivos); Entrada do usuário (Interativos, Qualitativos); Problemas do Mundo real (Robustos, Incerteza, Confiabilidade). Fica claro porque a computação evolucionária / algoritmos evolutivos / algoritmos genéticos são os mais populares – eles são os únicos que

preencheram todos os requisitos os tornando mais versáteis para resolver a maior gama de problemas de otimização

Tabela 2 - Atributos de métodos algorítmicos

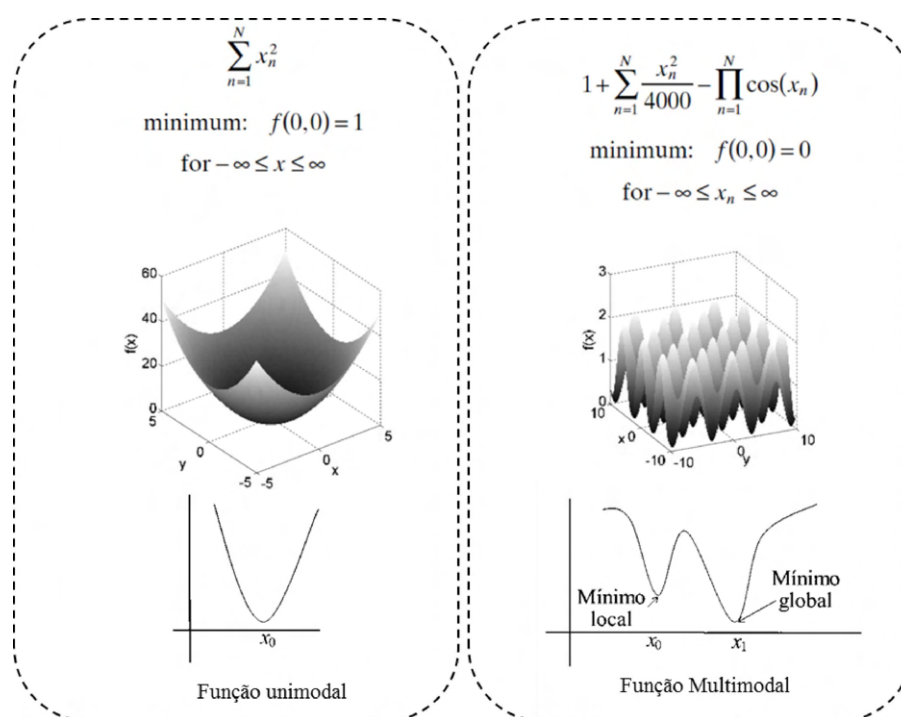
Algoritmos de otimização	Complexidade			Entrada de usuário		Mundo real		
	Restrito	Multifuncional	Multiojetivo	Interativo	Qualitativo	Robustez	Incerteza	Confiabilidade
Multiplificador de Lagrange	✓							
Projeção de gradiente	✓							
Gradiente Reduzido	✓							
Direção viável	✓							
Pesquisa direta / padrão	✓							
Salto-sapo / Função penalidade	✓							
Pesquisa Linearizada	✓							
Seleção clonal	✓							
Co-revolucionário	✓							
Computação Evolucionária	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Inteligência de Enxame	✓	✓	✓					
Recozimento simulado	✓	✓	✓					
Baseado em imunidade		✓	✓					
Pesquisa Aleatória		✓				✓		
Programação de Metas			✓					
Heurístico			✓					
Pesquisa Tabu			✓					
Aritmética Difusa			✓	✓				
Programação Matemática				✓		✓		
Teoria das Evidências					✓			
Determinista						✓	✓	
Sequencial Aproximado							✓	
Discreto								✓
Estratégia de confiabilidade inversa								✓

Fonte: (Evins, 2013)

Em (Evins, 2013) os autores detalham muitos dos métodos, e indicam suas características de otimização comuns para apoio no projeto de edificações sustentável. Todos são métodos heurísticos: eles não garantem chegar ao verdadeiro ótimo, mas oferecem um método eficiente que tem uma alta probabilidade de encontrar o melhor ou de se aproximar dele. Quando há facilidade no problema de otimização são recomendados os métodos de busca direta. Quando não, métodos de busca probabilística são melhores, pela robustez que tratam as descontinuidades da função. Esta dificuldade é predominante nos problemas de otimização de edificações. As referências são dadas por trabalhos e discussões mais recentes sobre a sua utilização (Nguyen, et al., 2014).

A Figura 6 apresenta a diferença de dificuldade de encontrar o mínimo/máximo da função uni modal e multimodal. Funções multimodais, geralmente são usadas na otimização de edificações sustentáveis pois envolvem descontinuidades nas funções, um dos principais motivos para os algoritmos evolutivos serem os mais escolhidos para resolver estes problemas difíceis. Na otimização do projeto de edificações, os analistas às vezes devem atribuir valores inteiros ou discretos às variáveis de projeto, o que faz com que a saída da simulação seja desordenada e descontínua. Mesmo com problemas de otimização, onde todas as entradas são variáveis contínuas, a natureza dos programas de simulação de edificações detalhada, muitas vezes gera descontinuidades na saída de simulação (Wetter, 2004) e (Wetter, et al., 2004).

Figura 6 - Função Unimodal versus Multimodal

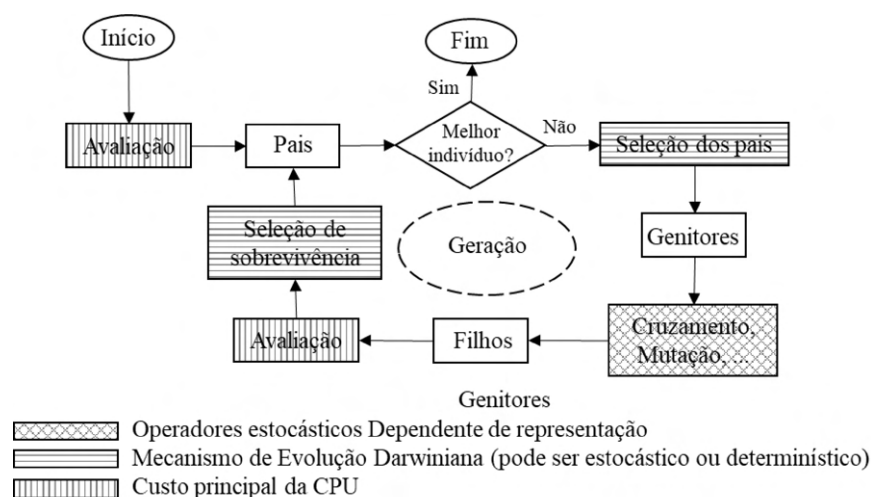


Fonte: (Haupt, et al., 2004)

Por exemplo, se o programa de simulação contém entradas empiricamente atribuídas (por exemplo, coeficientes de pressão do vento), solucionadores adaptativos com ajustes de precisão soltos ou solucionadores iterativos usando um objetivo de convergência (por exemplo, programa EnergyPlus), as saídas de simulação provavelmente serão descontínuas. Tais descontinuidades podem causar comportamento errôneo de algoritmos de otimização que resultam em fracasso ou afetam negativamente a convergência dos algoritmos de otimização (Wetter, et al., 2003)

Entre as metaheurísticas mais utilizadas na otimização de edificações visando o desempenho sustentável, estão os métodos inspirados naturalmente, em particular algoritmos evolutivos. Eles atuam em uma população de soluções, onde, em cada geração, um conjunto de indivíduos com boas combinações de genes são selecionados para formar a próxima geração, seja através da criação de novos indivíduos, seja pela transferência dos melhores indivíduos para a próxima geração (Dingwall, 2012), (Evins, 2013) e (Tresidder, 2014). Os algoritmos evolutivos podem lidar de forma eficiente com problemas não lineares com descontinuidades e muitos mínimos locais, e podem resolver problemas com objetivo único ou multiobjetivo, com ou sem restrições. Por outro lado, técnicas de otimização linear, como algoritmos de busca direta, na maioria das vezes, resulta em apenas uma única solução, deixando o projetista limitado a essa opção de projeto. Existem muitos métodos de otimização baseados em população. A Figura 7 apresenta uma ilustração do esquema de funcionamento de um algoritmo evolutivo, cujo funcionamento é baseado em um princípio evolutivo, onde uma população de soluções para o problema está sujeita ao princípio de sobrevivência do mais apto de (Darwin, 1859)

Figura 7 - Ciclo do Algoritmo Evolutivo



O algoritmo genético (GA) representa o mais popular de todos esses métodos (Dino, et al., 2017), (Evins, 2013). Algoritmos genéticos foram introduzidos no campo de projeto arquitetônico há dezenas de anos devido à sua robustez especial e implementação relativamente simples. Desde então, eles foram adotados em particular na otimização dos layouts de planta baixa por (Michalek, et al., 2002) e estruturas urbanas por (Finucane, et al., 2006), otimizando projetos de fachada de edificações por (Caldas, et al., 1999), otimizando formas de estruturas de edificações por (Papapavlou, et al., 2009), e projeto conceitual por (Soddu, 2005). Contudo, nenhuma regra que pode ser aplicada a essa conversão foi desenvolvida até agora. Em geral, os problemas que podem ser abordados pelo GA podem ser divididos em problemas combinatórios e numéricos (Li, 2012).

Em relação aos algoritmos multiobjetivo os mais utilizados são os evolutivos MOGAs (Multi Objective Genetic Algorithm). Os autores (Jones, et al., 2002) relataram que 90% das abordagens para a otimização multiobjetivo visavam aproximar a verdadeira Fronteira de Pareto para o problema. A maioria deles usou uma técnica meta-heurística, e 70% de todas as abordagens meta-heurísticas foram baseadas em princípios evolutivos. Seguem os algoritmos de otimização multiobjetivo mais utilizados na ciência do desempenho de edificações, segundo (Nguyen, et al., 2014), (Nielsen, 2002), (Evins, 2013) e (Machairas, et al., 2014).

- FFGA - Fonseca and Fleming's multiobjective EA
- NPGA - Niched Pareto Genetic Algorithm
- HLGA - Hajela and Lin's weighted-sum based approach
- VEGA - Vector Evaluated Genetic Algorithm
- NSGA - Deb and Srinivas's Nondominated Sorting Genetic Algorithm
- PAES - Pareto Archived Evolution Strategy
- PESA - Pareto envelop-based Selection Algorithm
- SOEA - Single-objective evolutionary algorithm using weighted-sum aggregation
- SPEA - Strength Pareto Evolutionary Algorithm
- NSGA2 - Non Sorting Genetic Algorithm 2
- SPEA2 - Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2

Sendo uma abordagem baseada em população, GA são bem adequados para resolver problemas de otimização multiobjetivo. Um GA genérico de objetivo único pode ser modificado para encontrar um conjunto de múltiplas soluções não dominadas em uma única execução. A capacidade do GA de pesquisar simultaneamente regiões diferentes de um espaço de solução torna possível encontrar um conjunto diversificado de soluções para problemas

difíceis com espaços de soluções não convexas, descontínuas e multimodais. O operador de cruzamento do GA pode explorar estruturas de boas soluções em relação a diferentes objetivos para criar novas soluções não dominadas em partes inexploradas da Fronteira de Pareto.

A Tabela 3 apresenta as Vantagens e desvantagens dos algoritmos evolutivos multiobjectivo. Pode se perceber que o Algoritmo PAES apresenta uma vantagem em relação ao popular NSGA-II e demais algoritmos para a metodologia proposta nesta tese, pois não trabalha com população e sim com mutação para gerar os filhos. Para o problema desta tese isso possibilita a evolução das soluções candidatas a partir de uma matriz binária que representaria a região de busca factível da morfologia do edifício, onde os elementos “0” da matriz podem representar o terreno e os elementos “1” as partes da edificação (módulos geométricos). Através da mutação desses módulos geométricos na região de busca factível, esta morfologia poderia ser otimizada com o auxílio do simulador EnergyPlus, acoplando-o ao algoritmo PAES, avaliação das soluções candidatas, visando encontrar a solução que apresente o menor consumo de energia e custo construtivo. A avaliação de desempenho das soluções candidatas por meio recursos tridimensionais torna a otimização lenta, necessitando, portanto, de um algoritmo com custo computacional aceitável. Sendo o PAES o único algoritmo que não trabalha com população e é baseado na mutação o mesmo é a melhor opção para resolver o problema com o auxílio da matriz binária para a mutação dos módulos geométricos.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos algoritmos evolutivos multiobjetivo

ALGORITMO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
NSGA	Rápida convergência.	Problemas relacionados ao parâmetro de tamanho de nicho.
NPGA	Processo de seleção muito simples com seleção de torneios.	Problemas relacionados ao parâmetro de tamanho de nicho. Contém parâmetro extra para seleção de torneios.
MOGA	Extensão simples.	Normalmente a convergência é lenta. Problemas relacionados ao parâmetro de tamanho de nicho.
SPEA	Bem testado. Nenhum parâmetro para agrupamento.	Algoritmo de agrupamento complexo.
SPEA 2	SPEA melhorado. Certifica de que os pontos extremos sejam preservados.	Cálculo computacional dispendioso.
PAES	Estratégia de mutação aleatória.	Não é uma abordagem baseada na população.
NSGA-II	Parâmetro único. Bem testado.	A distância de aglomeração funciona apenas no espaço objetivo.

Fonte: (Delinski, et al., 2017)

2.4 Escolha do algoritmo apropriado

A demanda de um método de busca que trabalha eficientemente em um problema de otimização específico levou à criação de vários algoritmos de otimização. Como resultado, a escolha de algoritmos de otimização para um problema específico é crucial para reduzir o esforço computacional (Nguyen, et al., 2014). Os autores (Wetter, 2009) e (Nielsen, 2002) afirmam que o problema de como selecionar um método de otimização não é trivial e, geralmente, envolve uma série de considerações, como:

- Natureza das variáveis de projeto: variáveis contínuas, variáveis discretas ou ambas.
- A presença de restrições na função objetivo.
- Natureza de funções objetivo (lineares ou não lineares, convexas ou não convexas, contínuas ou descontínuas, número de mínimos locais, etc.).
- A disponibilidade de derivadas analíticas de primeira e segunda ordem das funções objetivo.
- Características do problema (estático ou dinâmico, etc.).
- Desempenho de algoritmos potenciais que possuem características semelhantes.

Fornecer uma regra genérica para a seleção de algoritmos é geralmente inviável devido à complexidade e à diversidade de problemas de otimização do mundo real. No entanto, utilizando os dados da literatura relacionadas à otimização, pode-se observar que os algoritmos estocásticos baseados em população (GAs, PSO, algoritmos híbridos, algoritmos evolutivos) foram os métodos mais utilizados na otimização de desempenho de edificações. Tais algoritmos estocásticos não podem garantir que a melhor solução seja alcançada após um número finito de iterações, mas eles são utilizados para obter boas soluções em uma quantidade razoável de tempo (Nguyen, et al., 2014).

As principais características do problema são: um grande espaço multidimensional a ser pesquisado, necessitando de um método eficiente para convergir dentro de um tempo razoável; Um espaço multimodal que requer técnicas para evitar a convergência em falsos mínimos; Uma exigência não apenas para identificar um único resultado ideal, mas também para mapear as posições de uma gama de soluções de menor energia em todo o espaço; Uma gama de diferentes tipos de variáveis. Um espaço de busca altamente não-linearmente independente; E a necessidade de seleção final baseada em indivíduos.

O autor (Nguyen, et al., 2014), baseado em revisões importantes de outros autores, afirma que há uma série de razões que fazem o GA popular entre as comunidades de otimização para o desempenho de edificações. Dentre as mais importantes estão:

- Capacidade de manipulação de variáveis contínuas e discretas, ou ambos os tipos.
- A avaliação simultânea de n indivíduos de uma população, permitindo simulações paralelas em computadores com múltiplos processadores.
- Trabalhando com uma população de soluções, os GA são naturalmente adequadas para resolver problemas de otimização multiobjetivo (Deb, 1999).
- Robusto no manuseio de descontinuidade, problemas multimodais e altamente restritos sem ser preso a um mínimo local; mesmo com problemas NP-díficeis (Colomi, et al., 1990).
- Robusto para taxas de falha de simulação de altura, conforme relatado por J. Wright, em (Attia, 2012).

2.5 Otimização multiobjetivo

No mundo real dos problemas de projeto de edificação os projetistas muitas vezes têm de lidar com os objetivos de conflito de projeto simultaneamente, como por exemplo o consumo mínimo de energia versus conforto térmico máximo, o consumo mínimo de energia versus custo de construção mínima. Assim, a otimização multiobjetivo é, em muitos casos, mais relevante do que a abordagem de objetivo único (Fesanghary, et al., 2012) e (Hamdy, et al., 2011). Estas funções objetivo podem ser calculadas pelos simuladores de energia, por isso há uma tendência no acoplamento dos simuladores termo energéticos aos algoritmos de otimização multiobjetivo para o desempenho de edificações (Nguyen, et al., 2014).

As formulações multiobjetivo são modelos realistas para muitos problemas complexos de otimização de engenharia. Em muitos problemas da vida real, os objetivos considerados são conflitantes entre si e otimizar uma solução específica em relação a um único objetivo pode gerar resultados inaceitáveis em relação aos outros objetivos. Uma solução razoável para um problema multiobjetivo é investigar um conjunto de soluções, das quais cada uma satisfaça os objetivos em um nível aceitável sem ser dominada por qualquer outra solução (Konak, et al., 2006). A otimização multiobjetivo tornou-se um campo de pesquisa significativo. Grandes obras incluem (Fonseca, et al., 2003), (Burke, 2005), (Coello, et al., 2004) e (Coello, et al., 2007). As funções multiobjetivo são geralmente tratadas como uma soma ponderada ou um resultado de Fronteira de Pareto.

Numa abordagem de soma ponderada, os vários objetivos são combinados para formar um único objetivo, que é então otimizado da forma normal. A abordagem mais simplista, conhecido como "scalarization", é atribuir diferentes fatores de peso para cada objetivo e, em seguida, a função objetivo será simplesmente a soma ponderada dos objetivos (Wright, et al.,

2002). Como exemplo, a otimização multiobjetivo se transformará em um problema de objetivo único pela escalarização linear conforme apresentado na equação 2.

$$\min_{x \in X} \sum_{i=1}^n w_i f_i(X) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde w_i é fator de peso do i th função objetivo ($w_i > 0$).

A nova função objetivo é uma medida escalar. Como um exemplo, considera-se um problema de otimização de uma zona térmica que consiste de um custo de construção da função $F_C(X)$ e um desempenho de conforto da função $f_P(X)$. Essas funções podem ser integrados em uma única função objetivo através da atribuição de dois fatores de peso (w_1 e w_2), conforme apresentado na equação 3.

$$F(x) = w_1 f_C(X) + w_2 f_P(X) \quad (\text{Eq. 3})$$

O autor (Wang, et al., 2010) otimiza, simultaneamente, 3 funções objetivo, usando 3 fatores de peso igual para encontrar as configurações ideais de resfriamento, aquecimento e sistema de energia de um edificação. A desvantagem dessa abordagem é a dificuldade de estimar o fator de peso w_i porque funções objetivo não têm a mesma métrica ou o mesmo significado. Além disso, a otimização só pode dar uma única solução ideal.

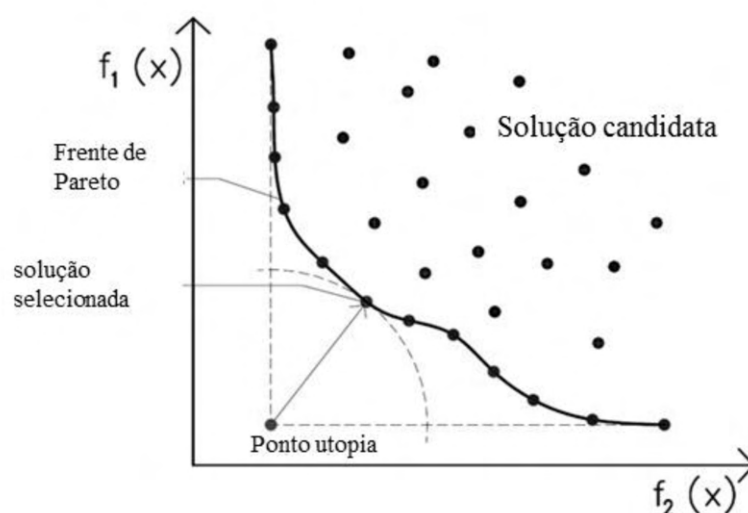
Alternativamente, na otimização multiobjetivo verdadeira, também chamada otimização de Pareto, uma gama de soluções são procuradas no espaço de busca entre cada objetivo. Esta frente trade-off, também chamado de frente Pareto, é definida com base no conceito de posição dominante. Para qualquer problema, o conjunto ótimo de Pareto pode ser constituído por um número infinito de pontos de Pareto. As estratégias de otimização de Pareto são, na maioria dos casos, destinadas a fornecer apenas alguns elementos do conjunto de Pareto, ao invés do todo (Evins, 2013).

O problema de como selecionar a melhor solução do conjunto de Pareto não é trivial, pois depende de vários aspectos (por exemplo, a importância das funções objetivas, a demanda dos investidores de construção, etc.). Esse processo é conhecido como tomada de decisão multiobjetivo (Labonnote, et al., 2017). Devido à complexidade do problema de otimização, os pesquisadores costumam usar até duas funções objetivo, mas muito poucas exceções com 3 ou mais funções têm sido observados, como apresentado em (Jin, et al., 2012), onde três funções objetivo foram qualidade do meio ambiente, o período de retorno de carbono e o tempo de retorno financeiro. Em (Diakaki, et al., 2010) o consumo de energia, emissão de CO₂ e custo de

investimento inicial e em (Caruso, et al., 2013) e (Chantrelle, et al., 2011) o consumo de energia, conforto térmico e custo de investimento inicial.

A Figura 8 apresenta uma estratégia comum em aplicações de engenharia para selecionar a melhor solução entre o conjunto Pareto de duas funções objetivo que são igualmente importantes, através da escolha do ponto central da Fronteira de Pareto. Os pontos da fronteira de Pareto são todos não dominados e, portanto, compõem a Fronteira de Pareto. Todos os pontos fora da fronteira de Pareto são dominados (já que existem soluções que são melhores em ambos os objetivos) e, portanto, não estão na Fronteira de Pareto.

Figura 8 - Tomada de decisão multiobjetivo através da Fronteira de Pareto



Fonte: (Nguyen, et al., 2014)

No Anexo E desta tese pode se observar informações gerais sobre a revisão de (Nguyen, et al., 2014). Na coluna “MO”, cada trabalho é identificado como: mono objetivo, multiobjetivo Pareto ou de soma ponderada. Dentre estes, 39% aplicaram a abordagem de um objetivo, 8% aplicaram a abordagem multiobjetivo de soma ponderada e 53% aplicaram a abordagem multiobjetivo de Pareto. O autor (Fesanghary, et al., 2012) afirma que a tendência é que a abordagem multiobjetivo seja priorizada porque a origem do problema de otimização de edificações é por essência multiobjetivo.

2.6 Pesquisas sobre otimização para projeto de edificações

As referências (Machairas, et al., 2014), (Evins, 2013), (Nguyen, et al., 2014) e (Shi, et al., 2016) apresentam revisões dos métodos de otimização para apoio no projeto de edificações. Pode se observar que a grande maioria dos trabalhos pesquisados por eles está limitada à otimização de componentes da envoltória, como janelas, sombreamento, sistemas,

embora a escolha da forma e setorização das funções da edificação (partido arquitetônico) seja um fator determinante para o consumo de energia ao longo do seu ciclo de vida.

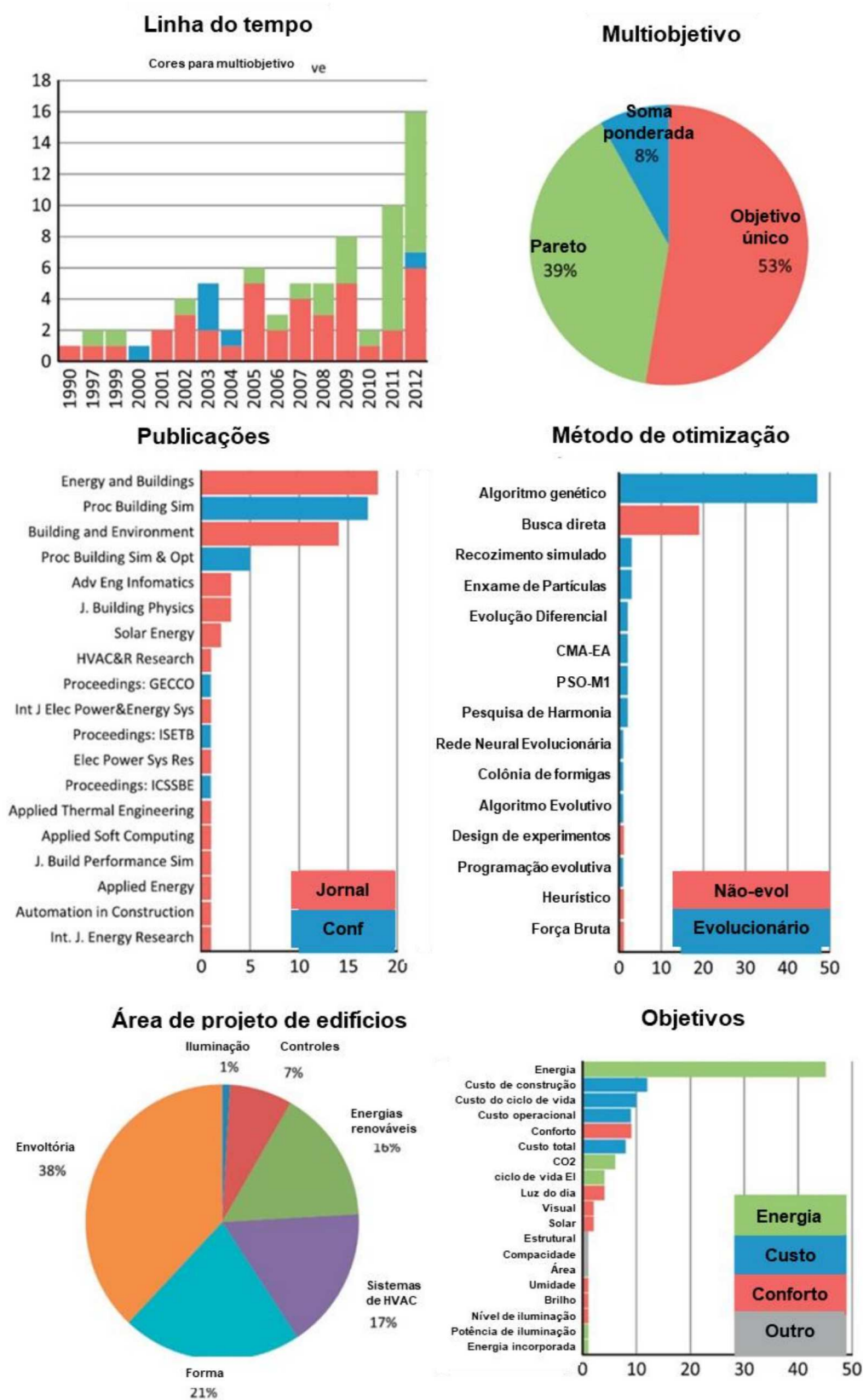
Os métodos de otimização aplicados a edificações segundo a revisão de (Evins, 2013) são apresentados no Anexo E. A Figura 9 apresenta informações gráficas sobre as obras incluídas na revisão da literatura de (Evins, 2013) sobre os métodos de otimização computacional aplicados ao projeto de edificação sustentável. Como pode-se observar existem poucos trabalhos de otimização que abordam a morfologia da edificação, que caracteriza a fase de partido arquitetônico, pois existe uma série de condicionantes (técnicas e legais) que tornam este processo difícil de ser automatizado, restringindo os modelos de otimização para resolver problemas de Retrofit. A forma de um edificação é uma das áreas mais controversas de projeto, com influências funcionais, estruturais, de conforto ambiental e de Eficiência energética. No que diz respeito ao projeto sustentável, a forma afeta os ganhos solares, a luz do dia e a perda de calor. Diferentemente das construções, muitas vezes é difícil representar formas de edificação como parâmetros diretos. Muito está a decorrer no domínio arquitetônico no que diz respeito aos meios de gerar formas complexas adequadas para o ajustamento e otimização (Evins, 2013) e (Pacheco, et al., 2012). Analisando a Figura 9 em concomitância com os conceitos abordados nos tópicos anteriores foi possível tirar algumas conclusões a respeito das tendências e lacunas de otimização para edificações, dentre as quais podemos citar:

- Algoritmos evolutivos (pela sua versatilidade em resolver uma maior gama de problemas de projeto)
- Multiobjetivo de Pareto (porque o projeto abrange objetivos conflitantes)
- Baseados em simulação (porque os simuladores fornecem diversas saídas de projeto)
- Otimização da energia, custo construtivo, operacional, custo do ciclo de vida e conforto ambiental (porque são as principais motivações dos investidores).

Lacuna encontrada:

- Carência de trabalhos de otimização do partido arquitetônico (porque a definição da forma abrange diversas condicionantes e metas conflitantes)
- A maioria dos trabalhos otimiza só os elementos da envoltória, que caracteriza uma fase de projeto avançada ou um Retrofit (porque otimizar elementos construtivos é mais fácil de otimizar a forma).

Figura 9 - Resumo gráfico sobre otimização na concepção de edificações



Fonte: (Evins, 2013)

A revisão sobre Algoritmos para otimização do projeto de edificação de (Machairas, et al., 2014) reforça que o número de trabalhos de pesquisa que otimizam a fase de partido arquitetônico ainda é pequeno. Uma possível explicação é que os estudos de simulação, que ajudam a definir a forma em função do desempenho, tornaram-se populares apenas na última década. Tendo em vista resolver esta importante lacuna apontada pela literatura, foram selecionados nas seções 2.7 abordagens de otimização baseados na simulação focadas no partido arquitetônico e, posteriormente foi realizada uma análise crítica sobre estes trabalhos na seção 2.8, identificando as vantagens e limitações dos métodos empregados para que se possa resolver esta lacuna de pesquisa. O ineditismo da metodologia proposta é apresentada na seção 2.9.

2.7 Análise das vantagens e limitações das pesquisas mais importantes

Em 2008, autora de (Caldas, 2008) apresentou uma ferramenta de otimização para pesquisar partido arquitetônico eficientes denominada GENEARCH. O método é aplicável ao projeto de edificações através de um algoritmo genético (GA) multiobjetivo acoplado ao software de simulação DOE2 como módulo de avaliação. A metodologia resulta em edificações com formas complexas que podem dificultar a construção e gerar custos excessivos. Caldas estendeu seu trabalho anterior para incluir vários objetivos no ambiente GENE_ARCH.

Em 2010, os autores de (Tuhus-Dubrow, et al., 2010) apresentaram uma abordagem baseada em algoritmos genéticos para otimizar dimensões de formas pré-definidas de planta-baixa. O método de otimização também usa o simulador DOE-2 acoplado a GA para minimizar o uso de energia para edificações redimensionando formas como: U, T, L, +, H, O, mas, diferente do GENEARCH, a metodologia é restrita à otimização das dimensões de formas pré-definidas. Ainda em 2010, o autor de (Wang, et al., 2010) otimizou, simultaneamente, 3 funções objetivo, usando 3 fatores de peso igual para encontrar as configurações ideais de um resfriamento edificação - aquecimento e sistema de energia. A desvantagem dessa abordagem é a dificuldade de estimar o fator de peso w_i porque funções objetivo não têm a mesma métrica ou o mesmo significado. Além disso, a otimização só pode dar uma única solução ideal. Devido à complexidade do problema de otimização, os pesquisadores costumam usar até duas funções objetivo, mas muito poucas exceções com 3 ou mais funções têm sido observados como apresentado em (Jin, et al., 2012) (três funções objetivo foram qualidade do meio ambiente, o período de retorno de carbono e o tempo de retorno financeiro), em (Diakaki, et al., 2010) (consumo de energia, emissão de CO₂ e custo de investimento inicial) ou em (Caruso, et

al., 2013), (Chantrelle, et al., 2011), (consumo de energia, conforto térmico e custo de investimento inicial).

Em 2013, os autores de (Caruso, et al., 2013) apresentaram um método para explorar uma forma geométrica ideal de um edificação que minimize a radiação solar direta e encontre diretrizes importantes para projetistas no início da etapa de tomada de decisão. A metodologia é capaz de otimizar a geometria da edificação com base na radiação solar, mas resulta em formas orgânicas difíceis de construir e não considera setorização das atividades e nem condicionantes do terreno. Ainda em 2013, os autores de (Bao, et al., 2013) apresentaram uma ferramenta capaz de gerar layouts de edificações para se adequarem às diretrizes regulatórias, ao mesmo tempo que atende a certas medidas de qualidade. A partir de um conjunto discreto de bons layouts, caracterizam analiticamente o espaço de forma local de boas disposições em torno de cada layout inicial, codificaram esses espaços e os ligam para suportar transições nos diferentes espaços locais. A vantagem da ferramenta é considerar limites de ocupação do solo e setorização em planta mas só considera uma função objetivo no processo de busca.

Em 2014, os autores (Yi, et al., 2014) também descreveram problemas de layout tridimensional em arquitetura e propuseram uma nova metodologia de tomada de decisão de projeto para configuração com base no melhor desempenho ambiental. A abordagem trabalha a setorização e a forma ao mesmo tempo através de diferentes tipologias geométricas, mas não exploram múltiplas funções objetivo e resultam em formas onerosas. Ainda em 2014, os autores de (Eve, et al., 2014) desenvolveram uma estrutura de projeto, intitulada Feedback de Desempenho de Energia Evolutiva para Projeto (EEPFD), desenvolvida para suportar a tomada de decisões de projeto inicial, fornecendo uma iteração rápida com feedback de desempenho através da parametrização, automação e otimização multiobjetivo. O trabalho aborda múltiplos objetivos, mas otimiza em função de uma volumetria pré-definida.

Em 2015, os autores de (Yi, et al., 2015) apresentaram um GA acoplado a uma simulação para otimizar a geometria plana, a localização e a altura de um conjunto de edificações, visando a eficiência energética do todo. O método proposto usa um sistema de controle de geometria em um agente que define o parâmetro para controlar um edificação hierarquicamente. A metodologia tem a vantagem de otimizar a localização e ao mesmo tempo a forma de um conjunto de edificações, mas parte de formas pré-definidas, limitando sua contribuição. Ainda em 2015, os autores de (Caruso, et al., 2015) apresentaram uma abordagem para a otimização das formas de edificação, usando o EnergyPlus, análise emergente e método de regressão Taguchi. O módulo BES usa a ferramenta EnergyPlus para simulação de energia, enquanto o módulo BEMA emprega métodos analíticos para estimar volumes emergentes e o

módulo MMD usa o método Taguchi para desenvolver um Metamodelo para uma simulação emergente de edificação completa, mais fácil e rápida. A metodologia otimiza a geometria com base em 3 programas que desempenham papéis diferentes, mas torna-se limitado trabalhando com formas predefinidas.

Em 2016, os autores de (Konis, et al., 2016) demonstraram a aplicação de uma nova Estrutura de Otimização de Desempenho Passivo (PPOF) para melhorar o desempenho das estratégias de iluminação natural, controle solar e ventilação natural nos estágios de projetos iniciais dos projetos arquitetônicos. A metodologia tem a vantagem de tratar as condicionantes do programa e objetivos de desempenho, mas realiza a busca apenas da forma, sem a definição da setorização das funções da planta baixa. Ainda em 2016, o autor de (Dino, 2016) apresenta o Evolutionary Architectural Space Layout Explorer (EASE), uma ferramenta de projeto que facilita a otimização de layouts espaciais 3D. O EASE aborda a exploração de projeto arquitetônico e a necessidade de atender a muitas alternativas simultaneamente em projeto de layout. A metodologia é interessante pois pode gerar layouts válidos, quantificar as restrições, grau de satisfação e encontrar uma série de soluções de layout ótimas, mas seu processo de busca parte de uma planta pré-definida. Ainda em 2016, os autores de (Brown, et al., 2016) abordam o potencial de otimização multiobjetivo (MOO) do partido arquitetônico para ajudar os criadores a gerar e selecionar soluções de uma variedade geometricamente diversificada de formas de edificações de alto desempenho. A metodologia tem a vantagem de apresentar novos dados que apresentam como as considerações de eficiência de materiais estruturais se comparam em magnitude ao uso total de energia da edificação, mas não leva em consideração as restrições físicas e nem o programa arquitetônico.

Em 2017, os autores (Nagy, et al., 2017) descreveram um fluxo de trabalho flexível para o projeto generativo de layout arquitetônico. Descreveram o fluxo de trabalho através de um aplicativo para o projeto de um novo espaço de escritório. A abordagem é interessante por buscar opções de setorização de atividades ideal de acordo com os trabalhadores, mas parte de um projeto pré-definido, limitando sua utilização para fases de readequação de projeto. Ainda em 2017, os autores de (Schwartz, et al., 2017) examinaram o potencial de acoplamento de simulações térmicas paramétricas e otimizações com programação automatizada generativa de projeto espacial, a fim de incorporar diferentes arranjos espaciais como um parâmetro de simulação independente. O trabalho potencializa as metodologias criadas pelos autores (Caldas, 2008) e (Tuhus-Dubrow, et al., 2010), citados anteriormente, para ajudar na definição da escolha do melhor projeto levando em conta a setorização e a forma, mas não leva em consideração questões relacionadas à compatibilização com a malha estrutural e nem as

condições de ocupação do solo locais. Ainda em 2017, os autores de (Guo, et al., 2017) apresentaram um método para a geração automática de um layout arquitetônico espacial, a partir de um programa arquitetônico especificado pelo usuário. A abordagem proposta vincula um sistema de busca de topologia multiagente e um processo de otimização evolutiva. A metodologia tem a vantagem de encontrar o layout espacial e a topologia com vários andares, mas deixa a desejar nos objetivos de desempenho e não se preocupa com os limites de ocupação do terreno.

Existem muitos pacotes de otimização paramétrica, como JEPlus, GenOpt, BEopt, MOBO, entre outros. No entanto, essas ferramentas não criam formas de construção, eles apenas otimizam formas predefinidas. O JEplus, por exemplo, otimiza a realização de uma investigação no arquivo idf para verificar as melhores variáveis do envoltória da edificação, a partir de um modelo 3D pré-definido. O Autodesk Revit, software BIM mais solidificado na indústria e na comunidade científica de projeto, possui um módulo chamado insight de otimização que cria alternativas de projeto “ótimas” e o usuário pode escolhê-las levando em consideração seus custos, através de Fronteiras de Pareto. No entanto, o usuário fica responsável por escolher a melhor estratégia para cada parte da construção, como: a melhor opção de percentual de abertura, a melhor opção de tamanho de proteção solar, a melhor opção de material, etc.

Portanto, a otimização por elementos construtivos, são limitações desses programas, tendo em vista o processo de otimização poderia levar em consideração a edificação como um todo em uma única execução. É importante salientar que esses programas também não criam opções otimizadas de formas de edificação, limitando-os para etapas avançadas de projeto ou para Retrofit. Os poucos trabalhos que criaram forma otimizada foram mencionados na literatura, mas nenhum deles preenche as condicionantes e objetivos dos projetistas.

2.8 Análise crítica sobre a revisão da literatura

Existem muitos pacotes de otimização paramétrica para auxílio no projeto de edificações como JEPlus (Zhang, et al.), GenOpt (Berkeley National Laboratory), BEopt (National Renewable Energy Laboratory), MOBO (VTT Technical Research Center of Finland and AaltoUniversity), entre outros conforme apresentado no Anexo F. No entanto, essas ferramentas não criam formas de edificações, elas apenas otimizam modelos predefinidos, embora esse aspecto represente um grande impacto no desempenho geral da edificação. Existem poucos modelos que criam a forma otimizada, mas nenhum deles atende a todas as condicionantes e objetivos dos projetistas. Uma explicação para isso é que os estudos

de simulação, que ajudam a resolver múltiplos objetivos de desempenho, tornaram-se populares apenas na última década, como concluído na revisão (Machairas, et al., 2014).

A maioria dos modelos de otimização, aplicados ao estágio inicial do projeto, usam Metaheurísticas, especialmente algoritmos evolutivos multiobjetivo. A simulação baseada em NSGA-II é a mais utilizada, como em (Eve, et al., 2014) (Tuhus-Dubrow, et al., 2010) (Konis, et al., 2016) (Schwartz, et al., 2017). Quase todos os trabalhos que realizam otimização multiobjetivo adotam a Fronteira de Pareto como um método de tomada de decisão, como em (Diakaki, et al., 2010), (Chantrelle, et al., 2011), (Brown, et al., 2016), (Wang, et al., 2005), (Hasan, et al., 2008) e (Jin, et al., 2012). Isso é explicado pela pluralidade e antagonismo das funções objetivas em relação ao método da soma ponderada, usado em (Wang, et al., 2010), que fornece apenas uma solução e é difícil prever o peso ideal de cada objetivo. A vantagem da otimização multiobjetivo de Pareto, ao invés do método de otimização monoobjetivo e soma ponderada é que o projetista tem muitas soluções que podem ser escolhidas priorizando um dos objetivos e condicionantes conflitantes presentes no estágio inicial do projeto (Machairas, et al., 2014).

Os métodos de cálculo de LCC (Life Cycle Cost) e LCA (life-cycle analysis) usados em (Tuhus-Dubrow, et al., 2010), (Hasan, et al., 2008) podem ser usados na otimização para minimizar os impactos econômicos e ambientais, respectivamente, provenientes das alternativas de projeto em todo o ciclo de vida do prédio (projeto, construção, operação/manutenção, demolição), no entanto, os projetistas raramente usam esses métodos por causa do tempo e esforço necessários para a implementação (Flager, 2012). Além disso, essas funções (LCC e LCA) possuem o mesmo princípio de otimização pelo método da soma ponderada porque reúne vários objetivos na mesma função. Isso retornaria apenas uma solução ótima porque é um objetivo único, deixando o projetista limitado a essa solução (Evins, 2013).

O confronto entre consumo de energia versus objetivo de custo construtivo é o mais importante nesta etapa, pois determina o custo benefício das estratégias de projeto implementadas (Russell, et al., 1981). Alguns trabalhos como (Caruso, et al., 2013) consideram apenas o objetivo de desempenho energético e (Yi, et al., 2014) apenas a irradiação solar, o que impossibilita a escolha de uma solução ideal para o estágio inicial do projeto. Os objetivos do projeto funcional são abordados em alguns trabalhos, como (Dino, et al., 2017), (Nagy, et al., 2017) e (Guo, et al., 2017). A maioria desses modelos gera formas de edificação com um padrão construtivo que não é atraente nos aspectos financeiros e estruturais, como em [30, (Jin, et al., 2012), (Kampf, et al., 2010), (Ouarghi, et al., 2006), (Caldas, 2008) e (Caruso, et al., 2013). Não há preocupação com a aplicação de formas simplificadas para garantir a estabilidade

estrutural³ e na maioria dos trabalhos os limites de ocupação do terreno não são considerados, exceto em (Bao, et al., 2013).

Todas as metodologias citadas acrescentam muitas vantagens, mas nenhuma cumpre a maioria dos objetivos funcionais e de desempenho. Além disso, eles não otimizam o envoltória completo e não atingem a eficiência total com as técnicas de otimização aplicadas à busca de formas.

2.9 Inovação desta abordagem em relação à literatura

Esta tese apresenta uma metodologia inédita para a busca do partido arquitetônico da edificação, a fim de atender os objetivos mais voltados para a fase inicial do projeto, respeitando as condições do projeto e do terreno. A novidade deste trabalho consiste em sua metodologia, que é baseada na maneira pela qual o algoritmo de otimização baseado em simulação realiza o processo de busca de soluções de partido arquitetônico com o menor consumo de energia e custo construtivo. Ao contrário de todos os modelos mencionados, a metodologia proposta visa a criação de soluções ótimas de partido arquitetônico, e cumpre os principais objetivos do projeto (custo de construção versus eficiência energética) e condicionantes (técnicas, legais e financeiras) que são investigadas através do esquema de modulação geométrica em matriz e seleção de materiais para compor as diferentes combinações de elementos construtivos característicos dessa fase.

O usuário insere os condicionantes da edificação e o algoritmo executa processo de pesquisa na região de busca factível baseada na matriz binária 3D. Com isso, se ganha a investigação da morfologia da construção de forma livre, que proporciona um amplo espaço de busca do partido arquitetônico com o menor consumo de energia e custo construtivo, que são as principais motivações dos investidores e usuários finais. Diferente dos pacotes de otimização comercial citados, não seria possível realizar a pesquisa a partir de um 3D pré-definido modelo, porque ao mudar a forma de um edificação usando os módulos geométricos, o número das paredes presentes nele são alteradas. Tendo em vista a novidade deste processo metodológico, foi necessário detalhar como se idealizou resolver esse problema (formulação do problema de otimização). As vantagens do modelo de otimização proposto em relação às citadas anteriormente incluem:

³ A complexidade da forma do edifício é diretamente proporcional à sua estabilidade estrutural pois depende da homogeneidade dos elementos estruturais que sustentam o edifício. Formas mais complexas são mais difíceis de conseguir estabilidade estrutural e são mais caras de se construir devido os requisitos específicos para sua execução.

- Busca da melhor combinação dos elementos construtivos e forma da edificação, visando menor custo construtivo e maior eficiência energética (objetivos conflitantes), considerando o clima, os limites de ocupação do terreno;
- Busca da solução de projeto que atenda o bom desempenho econômico, ambiental, energético, térmico;
- Ferramenta de fácil utilização baseada em entradas do usuário relacionadas a condicionantes de projeto de edificações;
- Região de busca factível em malha, que aumenta a estabilidade estrutural e reduz os custos construtivos pela geração de formas geométricas simplificadas;
- Metodologia aplicável a qualquer modalidade de projeto, clima e tamanho de terreno;
- Otimização baseada em simulação que aproveita todo o potencial computacional de múltiplos objetivos de desempenho do simulador EnergyPlus, para avaliar soluções, considerando a geometria tridimensional da edificação;
- Tomada de decisão sobre as soluções ótimas levando em consideração os objetivos confiáveis de consumo energético versus custo, através da fronteira de Pareto para se determinar o melhor custo benefício levando em consideração a limitação financeira do investidor e os interesses do usuário;
- Tempo computacional reduzido, fornecido pelo uso do algoritmo adequado para a busca de formas de edificação, pela mutação da geometria;

Este capítulo apresentou técnicas de otimização para auxílio no projeto de edificações de alto desempenho, que incluem: otimização baseada em simulação termo energética, otimização multiobjetivo, algoritmos, trabalhos relacionados e inovação desta abordagem em relação à literatura. No Capítulo seguinte é apresentado um modelo de otimização multiobjetivo baseado em simulação para auxiliar os profissionais de projeto na definição da solução ótima na fase de estudo preliminar de projeto de edificações, visando o desempenho sustentável de múltiplos objetivos.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado um modelo de otimização multiobjetivo baseado em simulação para auxiliar os profissionais de projeto na definição da solução ótima na fase de estudo preliminar de projeto de edificações, visando o desempenho sustentável de múltiplos objetivos.

Na primeira etapa é realizada a formulação do problema de otimização e adaptação do algoritmo ao problema, incluindo o acoplamento do simulador e sua comunicação com o “módulo geométrico” de energia. Na segunda etapa, após a finalização do algoritmo é necessário executá-lo para monitorar a sua convergência e definir o objetivo de parada do algoritmo. A terceira etapa é abordada no Capítulo 4, onde são interpretados os resultados do estudo de caso, discutindo o desempenho dos indivíduos selecionados.

3.1 Formulação do problema de otimização

A fase de estudo preliminar de projeto de edificações é caracterizada pela definição volumétrica da edificação. Diante de um espaço infinito de busca, o projetista deve encontrar a solução energética mais eficiente associada a um custo construtivo viável. Também é necessário atender condições como: clima, limites de ocupação do terreno e programa de necessidades de projeto. Considerando esses objetivos, foi possível concluir que a busca pelas melhores configurações de edificações pode ser caracterizada como um problema de otimização combinatória multiobjetivo, pois é possível realizar a busca pela melhor forma, por um matriz binária onde os elementos 1 podem representar a edificação na vista superior, atendendo aos múltiplos objetivos assinalados.

As matrizes A1, A2 e A3 representam a região de busca factível, em vista superior. A matriz A1 apresenta que é possível definir qualquer dimensão de terreno através da inserção de elementos 0 que representem uma região de busca factível. A matriz A2 apresenta um exemplo de terreno vazio (representado pelo elemento 0) e a matriz A3 apresenta este mesmo terreno com a inserção dos elementos 1, correspondendo à geometria da edificação na vista de cima. O tamanho da região de busca factível pode ser definido pelo número de elementos 0 e a área de edificação pode ser definida pelo número de elementos 1. Os elementos 1 devem ser transformados em volumetria se forem substituídos por módulos geométricos tridimensionais. A quantidade desses módulos geométricos a nível vertical pode definir a quantidade de andares da edificação. Um software de simulação pode ser acoplado ao algoritmo

de otimização para avaliar a adequação das soluções candidatas no processo de otimização. Com esta formulação do problema de otimização, é possível atender ao programa de necessidades de projeto, objetivos e limites de ocupação do terreno, em cada situação de projeto específica.

$$A1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad A2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Para resolver este problema, foi elaborado um modelo de otimização baseado em simulação, pois, como mencionado na literatura, o modelo de otimização aproveita todo o potencial computacional baseado em um modelo tridimensional. O simulador EnergyPlus⁴ (U.S. Department of Energy's (DOE) - Building Technologies Office (BTO)) foi acoplado ao algoritmo de otimização multiobjetivo PAES, para avaliar o desempenho das soluções durante o processo evolutivo. Antes de executar, o usuário entra com os parâmetros de projeto, terreno e clima, apresentados na Tabela 4. A quantidade de elementos 1 nos níveis vertical e horizontal deve ser definida de acordo com os limites locais do terreno. A Tabela 4 apresenta um exemplo de entradas do usuário para encontrar a melhor solução de projeto para um edificação de 300 m², distribuído em 3 andares, em um espaço de busca factível de 225 m² (matriz 3x3). Uma matriz 3x3 deve ser adotada como região de busca factível, porque é equivalente ao tamanho de terreno do estudo de caso, que corresponde a 225 m². Este cálculo é feito com base no tamanho do módulo geométrico que mede 5x5 metros (tamanho médio de um compartimento), ou seja, cada lado da região factível representa 25 metros e para se ter a metragem quadrada de um quadrado de 9 x 25 basta multiplicar os dois lados, que equivale a 225 m². Caso p terreno possua alguma irregularidade ou elemento interno que necessite ser contornado, existe a possibilidade de definir a região da matriz como elementos nulos para que o processo de busca não ocorra em tais posicionamentos.

⁴ O EnergyPlus foi escolhido porque o software de simulação detalhada mais usado e consolidado na comunidade científica de otimização do desempenho de edificações. Por trabalhar com um arquivo de texto, proporciona fácil comunicação com os algoritmos de otimização (Nguyen, et al., 2014).

Tabela 4 - Entradas do usuário correspondentes ao exemplo contido na Figura 1⁵

Item	Entradas do usuário
Arquivo climático (.epw)	Arquivo .epw
Dimensões do "Módulo Geométrico" (X, Y, Z)	5,0x5,0 m
Número de módulos geométricos, horizontalmente (área útil)	4
Número de módulos geométricos, verticalmente (número de andares)	3
Número máximo de janelas por "Módulo geométrico"	1
Região de busca factível (número de linhas e colunas da matriz)	3x3

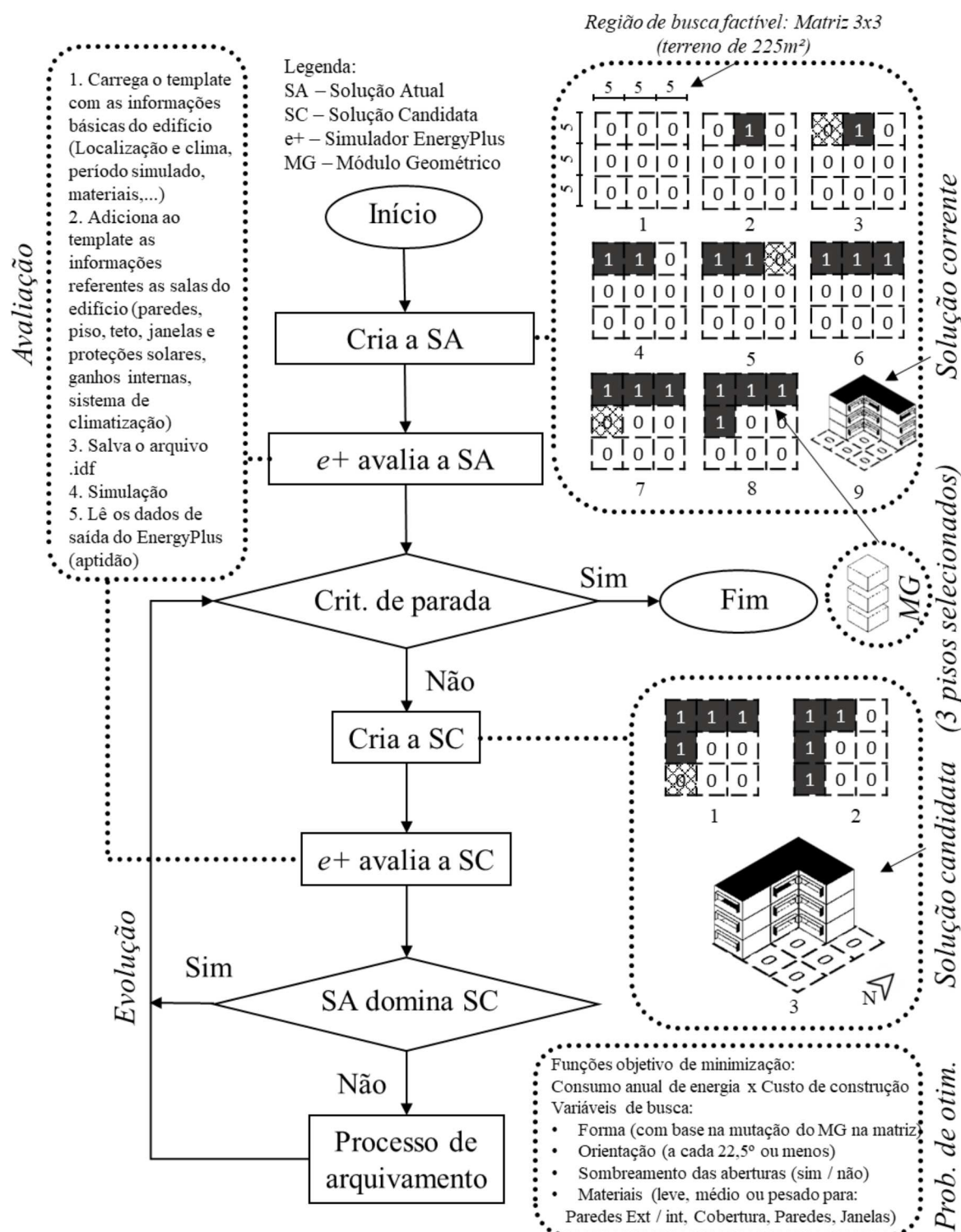
A Figura 10 apresenta a ilustração do modelo de otimização proposto, adotando as condicionantes de projeto apresentadas na Tabela 4 e aplicáveis a qualquer situação. O processo de busca ocorre a partir de uma matriz binária, onde os componentes da matriz evoluem ao longo das gerações, até encontrar a melhor configuração da forma da edificação, pela mutação do módulo geométrico. O simulador EnergyPlus é acoplado ao algoritmo de otimização. Inicialmente, o algoritmo PAES gera uma solução inicial⁶ aleatoriamente e usa o simulador EnergyPlus para avaliar essa solução. Depois disso, a solução atual é adicionada ao arquivo externo e, em seguida, o algoritmo gera a solução candidata pela mutação da solução atual. A solução candidata também é avaliada pelo EnergyPlus e seus recursos são comparados com a solução atual. Se a solução atual dominar a solução candidata, essa solução será descartada e outra solução será gerada. Caso contrário, o processo de arquivamento é executado para verificar se a solução candidata está arquivada ou substituirá a solução atual. A localização do módulo geométrico e seus parâmetros construtivos sofrem a mutação, criando uma nova solução, que será avaliada pelo EnergyPlus, de acordo com as funções objetivo e arquivo climático. Assim, as variáveis de estudo (orientação, paredes, teto, pisos e sombreamento das aberturas), bem como a forma da edificação a partir das matrizes binárias, são investigadas pela evolução natural. Após várias gerações, o algoritmo atinge o critério de parada e encontra a Fronteira de Pareto, composta pelas soluções ótimas de partido arquitetônico, as quais apresentam a melhor relação entre consumo de energia e custo construtivo, de acordo com as variáveis ambientais presentes no arquivo climático⁷.

⁵ Recomenda-se adotar uma matriz com metade dos elementos 0 e a outra metade com os elementos 1, para garantir uma maior diversidade na busca. Com a otimização concluída, os elementos 0 podem caracterizar a área permeável com arborização, aumentando ainda mais a eficiência energética através da redução de ilhas de calor.

⁶ O nome técnico da solução inicial é a solução atual, conforme apresentado na Figura 10.

⁷ O reconhecimento do arquivo climático é realizado no código de programação apontando o caminho do mesmo

Figura 10 - Modelo de otimização proposto



Fonte: elaborado pelo autor

3.2 Funções objetivo

A eficiência energética e o custo construtivo são os objetivos de desempenho mais direcionados no estágio de projeto inicial da edificação. Um projeto mais eficiente em termos

de energia nem sempre tem um custo construtivo menor (Pacheco, et al., 2012). Diante dessa importância e antagonismo, foram selecionadas as seguintes funções objetivo:

- Minimizar o consumo anual de energia por m² (kWh/m²/ano), calculado usando a saída “LEEDSummary” do EnergyPlus.
- Minimizar o custo construtivo(R\$): calculado pela saída "ComponentCostEconomicsSummary" do componente EnergyPlus, que está associado aos materiais disponíveis no módulo geométrico para os componentes: paredes externas, paredes internas, coberturas, pisos e janelas.

3.3 Variáveis de busca

Os fatores com maior impacto na demanda final de energia são o fator de forma, a orientação e as propriedades termo físicas dos materiais de construção (Bektas, et al.). Portanto, pretende-se usar essas variáveis no processo de busca. Cada solução consiste em 8 elementos, cada elemento representando uma Variável de busca. O primeiro elemento corresponde à forma da edificação, representada por um matriz binária e os demais elementos representam os materiais de construção, os sombreamento das aberturas e a orientação da edificação, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Descrição das variáveis de busca e objetos EnergyPlus correspondentes

Variável de busca	Descrição	Objetos EnergyPlus correspondentes
Forma construindo	Matriz binária representando os módulos geométricos da edificação não pode ser nula ou completa	"BuildingSurface: Detalhado"
Materiais da parede exterior	Restrito à parede leve, à parede média e à parede pesada	"Construção"
Materiais da parede interior	Restrito a paredes leves e paredes pesadas	
Materiais de piso	Restrito a Piso Leve, Piso Médio e Piso Pesado	
Materiais de telhado	Restrito a coberturas leves, coberturas médias e coberturas pesadas	
Materiais para janelas	Restrito a janela leve, janela média e janela pesada	
Sombreamento das aberturas	Se há ou não sombreamento	"Sombreamento das aberturasZone: Detalhado"
Orientação da edificação	Ângulo realizado entre o norte da edificação e o norte verdadeiro	Campo North Axis do objeto "Building"

Fonte: elaborado pelo autor

3.4 Módulo Geométrico

O módulo geométrico é um modelo 3D, no formato idf do EnergyPlus, que representa um módulo da geometria mutante no processo de busca evolutiva. O módulo geométrico foi modelado usando o software Revit (Autodesk) e exportado para o formato idf⁸ do EnergyPlus. O módulo geométrico foi criado de acordo com o Apêndice G da ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2010) e com as diretrizes do ASHRAE Handbook Fundamentals (ASHRAE, 2005). Isso garante que a análise de energia feita no método de avaliação de desempenho inclua todos os custos e padrões de energia associados ao projeto da edificação. A rotina do módulo de geometria deve ser configurada pelo usuário de acordo com a modalidade de projeto (residencial, comercial, escritório, escola, museu ou qualquer outra modalidade). A Tabela 6 apresenta um exemplo de um módulo geométrico, configurado para atender a rotina de um edificação de escritórios, que funciona de manhã e à tarde, totalizando um período de 8 horas diárias. Contém apenas uma zona térmica, com sistema de aquecimento e/ou refrigeração que é escolhido de acordo com o clima. Suas dimensões podem ser alteradas pelo projetista de acordo com o programa de necessidades de projeto.

Tabela 6 - Exemplo de configuração de módulo geométrico

Item	Entradas do usuário
Clima	Arquivo climático (.epw)
Tamanho da área	5,0x5,0 m
Tamanho das janelas	3,5x1,2 m
Sombreamento das aberturas	3,5x1,2x0,7 m
Pessoas	3 por zona
Iluminação	10 W/m ²
Equipamentos	5,4 W/m ²
Ar condicionado	Aquecimento e/ou Refrigeração VAV COP 5 W/W

Fonte: elaborado pelo autor

O contato com o solo, as reflexões e as cores foram mantidas padrão. Os materiais de construção foram configurados usando a biblioteca ASHRAE, contida na pasta de instalação dos conjuntos de dados do EnergyPlus. Todos são classificados como leves, médios e pesados⁹:

⁸ Esse fluxo de trabalho é recomendado porque a tecnologia BIM possui interface de usuário para criação de modelo e suporta todos os parâmetros necessários para uma simulação posterior no EnergyPlus. Depois de exportar para o formato idf, é aconselhável refinar os parâmetros mais detalhados no EnergyPlus.

⁹ Capacidade de isolamento térmico do elemento construtivo. Os leves isolam menos e os pesados isolam mais.

- 3 paredes externas com isolamento composta por blocos de concreto de diferentes espessuras;
- 2 paredes internas: 1 placa de gesso leve e 1 tijolo cerâmico;
- 3 telhados com telhas acústicas e laje maciça de diferentes espessuras;
- 3 pisos com estrutura maciça de concreto de diferentes espessuras;
- 3 janelas: 2 com vidro de diferentes espessuras e 1 com vidro duplo.

O preço de materiais e serviços (R\$/m²) de cada elemento construtivo foi dimensionado de acordo com os valores presentes na TCPO (Tabela de Composição de Preços para Orçamento) (Pini, 2010). Todos os materiais têm diferentes custos, espessuras e desempenho térmico, conforme apresentado na Tabela 7. O Apêndice A apresenta o detalhamento das camadas de cada um desses componentes construtivos com seus respectivos valores.

Tabela 7 - Alternativas construtivas de componentes do módulo geométrico

Item	Código de script	Material	R\$/m ²	Espessura(mm)	U (W/m ² K) ¹⁰ / FS ¹¹	α ¹²
Paredes externas	1	Leve	42,14	100	U=2,78	0,4
	2	Médio	58,16	200	U=1,82	0,4
	3	Pesado	82,91	400	U=0,90	0,4
Paredes internas	1	Leve	52,83	78	U=1,26	0,4
	2	Pesado	75,30	238	U=2,69	0,4
Cobertura	1	Leve	149,09	400	U=2,25	0,4
	2	Médio	158,87	400	U=1,92	0,4
	3	Pesado	163,65	500	U=1,99	0,4
Pisos	1	Leve	51,46	100	U=2,48	0,4
	2	Médio	61,24	100	U=2,22	0,4
	3	Pesado	85,36	200	U=1,75	0,4
Janelas	1	Leve	474,24	6	FS=0,60	0,6
	2	Médio	509,77	12	FS=0,70	0,6
	3	Pesado	829,21	6/6	FS=0,80	0,6
Sombreamento das aberturas	0/1	Sombreamento	149,09	400	U=2,48	0,4

Fonte: elaborado pelo autor

¹⁰ Transmitância térmica U (W/m²K) é a quantidade de calor que atravessa cada segundo de um metro quadrado de uma estrutura da espessura de 1 metro com uma diferença de temperatura entre duas camadas de ar de um K.

¹¹ Fator solar do vidro é a Porcentagem de energia solar que incide no vidro e se transfere para o lado interno, tanto direta como indiretamente

¹² Absorbância é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Quanto mais clara é a cor da superfície maior a capacidade de refletir o calor solar.

3.5 Modelo de Otimização

O algoritmo PAES (Pareto Archived Evolutionary Strategies) foi escolhido para resolver este problema de otimização. É um algoritmo evolucionário multiobjetivo criado por Knowles e Corne em 1999 (Knowles, et al., 1999) e (Knowles, et al., 2000). É baseado no algoritmo $(1 + 1)$ - Estratégias Evolutivas, que apenas uma solução é mantida por geração e possui um arquivo externo para armazenar as soluções não dominadas, respeitando o objetivo de diversidade.

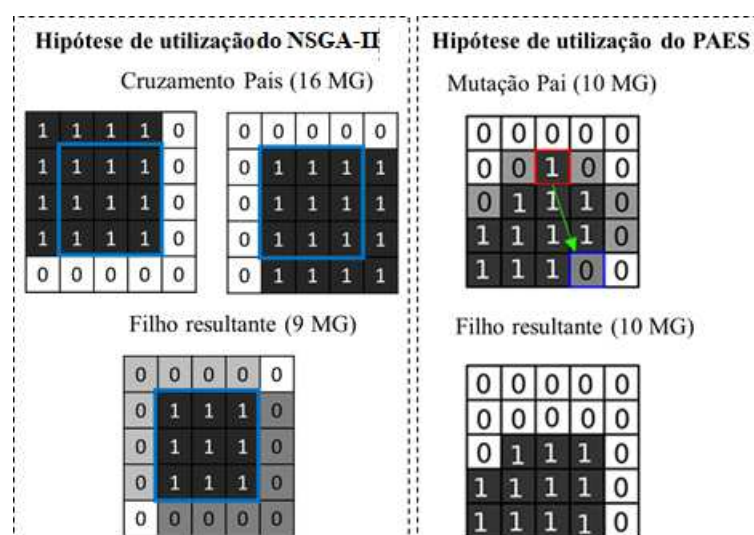
A escolha do algoritmo PAES ao invés do amplamente utilizado NSGA-II (Deb, et al., 2002), entre outras metaheurísticas consolidadas, deveu-se ao alto tempo computacional requerido pelo NSGA-II, para que as simulações executassem a função objetivo. Vários algoritmos de otimização multiobjetivo, como NSGA-II ou SPEA2 (Zitzler, et al., 2001), trabalham com soluções populacionais, ou seja, a cada iteração várias novas soluções são geradas e devido ao uso de simuladores acoplados, um grande número de soluções precisa ser avaliado em cada nova iteração, o que torna o tempo de busca para a solução ótima muito lento.

Por exemplo, o popular Algoritmo NSGA-II trabalha com a comparação de duas soluções, obtendo a população filha, a qual é utilizada para prosseguir com a execução do problema. No torneio uma solução domina a outra quando tem o melhor rank (ordenamento) e se caso possuam o mesmo rank, domina a que tiver melhor distância. Assim, é realizada a mutação e recombinação dos indivíduos. Após isso, com o intuito de garantir o elitismo, os conjuntos pai e filho são aglomerados na mesma população para aplicar a classificação não dominada em frentes de dominância. Já o Algoritmo PAES é caracterizado por um pai originar apenas um filho, utilizando arquivo externo onde contém soluções ótimas que já foram obtidas, como também realiza uma busca no próprio arquivo. Sendo esta denominada como uma estratégia evolutiva $(1+1)$. Assim, é utilizado este arquivo como referência para a classificação de dominância dos indivíduos (Delinski, et al., 2017).

Portanto, para o problema em questão, a mudança de posição dos módulos geométricos no processo de otimização pode ser realizado de forma mais eficiente por meio da mutação proporcionada pelo Algoritmo PAES, que, diferente do NSGA-II, possui um tempo computacional mais rápido devido à ausência da etapa de cruzamento, necessária gerar novos indivíduos. Por meio da mutação os módulos geométricos podem ser realocadas ao invés de sobrepostos para uma posterior subtração dos pais para se gerar um filho, conforme ilustrado na Figura 11. Esta etapa combina duas ou mais soluções, previamente selecionadas, para gerar uma ou mais novas soluções, visando a variabilidade genética no processo de otimização. Esta operação, se aplicada a matrizes binárias, poderia gerar edificações com um número de módulos

geométricos diferentes daqueles estabelecidos pelo projetista, conforme apresentado na Figura 11. Existem maneiras de contornar esse problema, por exemplo, excluindo soluções inviáveis e gerando outras, mas isso aumentaria o custo computacional, que é bastante alto devido às simulações.

Figura 11 - Hipótese de utilização do Algoritmo NSGA-II versus PAES neste problema¹³



Fonte: elaborado pelo autor

Em suma, a principal razão para a seleção do PAES no processo de busca é a ausência de soluções populacionais, pois, gerando apenas uma solução por iteração, o simulador acoplado ao PAES será executado apenas uma vez. Outro motivo que contribui para a seleção do PAES é a possibilidade de usá-lo sem a operação de cruzamento, característica dos algoritmos evolutivos mais utilizados. Conforme identificado na Revisão da literatura este é um fator determinante para a escolha do algoritmo PAES para esta formulação de problema porque o acoplamento do simulador EnergyPlus trás muitas possibilidades de saída mas demanda maior tempo computacional, necessitando, portanto, de um algoritmo que tenha um custo computacional aceitável diante das condições impostas. As etapas da criação do primeiro processo atual de solução, mutação, avaliação e arquivamento são descritas em mais detalhes nas seções 3.5.1 a 3.5.5.

3.5.1 Modelo para criar o arquivo idf do EnergyPlus

Antes da execução do algoritmo evolutivo, o módulo geométrico (arquivo idf) é dividido em 2 partes. A primeira parte é composta de informações gerais da edificação, como:

¹³ A sigla MG representa o módulo geométrico

localização, clima, materiais, etc. Esse arquivo funciona como um modelo usado em todo o processo evolucionário. Em relação aos materiais de construção, todos são armazenados no modelo. O cálculo do custo construtivo é feito usando os materiais presentes nas superfícies do modelo tridimensional. Todas as possibilidades de materiais construtivos, descritas na seção 3.4, foram inseridas no modelo. No processo evolutivo, o algoritmo encontra o material com o menor consumo de energia e custo para cada elemento construtivo, dentre os existentes no modelo, desconsiderando os demais que não foram selecionados.

A segunda parte consiste em um script que armazena as informações específicas de cada módulo geométrico (iluminação, superfícies, materiais e outros) e as informações tridimensionais da edificação (posição das paredes, janelas, pisos, teto e sombreamento). Este script foi criado usando a biblioteca Pyidf (Pyidf), usada na criação, leitura e escrita de arquivos ids do EnergyPlus, pela linguagem de programação Python (Phyton). Durante a execução do algoritmo evolutivo, no estágio de avaliação de soluções, as informações contidas no modelo são carregadas no script. Em seguida, as informações específicas e tridimensionais do módulo geométrico contido no script são inseridas de acordo com as variáveis de busca presentes na solução.

3.5.2 Criando a solução inicial (atual)

A criação inicial da solução ocorre aleatoriamente em sua totalidade. Para a busca de variável de forma, uma matriz vazia composta apenas por 0 elementos, especificada pelo usuário de acordo com as dimensões do terreno, é criada primeiro. Em seguida, o algoritmo seleciona um elemento aleatório na matriz e transforma esse valor em 1. Por fim, uma busca iterativa aleatória dos valores 0 é executada, adjacente aos valores 1 da matriz, e os valores são transformados em 1 até atingir o número de módulos geométricos especificado pelo usuário, conforme apresentado na Figura 10, na área "Solução Corrente". É importante ressaltar que para a edificação ter vários andares, o usuário deve definir o número dos módulos geométricos, gerando uma pilha deles. Este grupo de módulos geométricos é considerado pelo algoritmo como um elemento 1 no plano horizontal da região de busca factível. Em relação às demais variáveis de busca, são selecionados valores aleatórios para cada elemento, dentro das condicionantes apresentadas na Tabela 5.

3.5.3 Avaliação de soluções

Nesta etapa, as soluções geradas são convertidas em módulos geométricos e avaliadas por simulação. Os dados de saída são lidos e usados como adequação para cada solução no

processo evolutivo. As soluções originadas pela mutação dos elementos da matriz 1 são transformadas em modelos 3D, para representar o partido arquitetônico da edificação. A forma de edificação e o número de módulos geométricos são inseridos no arquivo idf, usando as informações contidas na matriz binária, onde cada número 1 representa um módulo geométrico.

Os materiais dos componentes (paredes externas, paredes internas, pisos, teto e janelas) referem-se a toda a edificação. Quando um determinado material é selecionado, ele será inserido em todas as superfícies categorizadas para esse tipo de material. O mesmo vale para a variável de sombreamento das aberturas. Se uma solução não os apresentar, todas as janelas do prédio, sem exceção, não terão sombreamento. Em seguida, o script salva todos os parâmetros construtivos em um arquivo idf. Com este arquivo salvo, o algoritmo de otimização chama o simulador EnergyPlus para executar a simulação nesse arquivo. Após a simulação, o script Python carrega o arquivo de saída do EnergyPlus, salvo no formato csv, para extrair a adequação de energia e custo construtivo correspondente a essa solução.

Algumas condições foram programadas no roteiro para garantir o cálculo correto no processo de otimização frente aos objetivos propostos. Entre eles estão:

- As janelas foram programadas para existir apenas no envoltória da edificação;
- Quando ocorre a união horizontal de dois módulos geométricos, as duas paredes resultantes dessa união foram programadas para se tornar um objeto de parede única;
- Quando o usuário define uma quantidade vertical de módulos geométricos maior que um, a superfície categorizada como um telhado é convertida em um objeto de superfície do piso, com apenas a superfície superior do telhado sendo preservada;
- Se o usuário não selecionar busca de janela em todas as faces da parede, o objetivo para definir qual lado da parede existirá será a colocação em lados opostos para favorecer a iluminação e a ventilação natural/renovação do ar, quando o ar condicionado não estiver sendo usado, deixando a objetivo do algoritmo a escolha da orientação da edificação que recebe mais ou menos transferência de calor, de acordo com as variáveis meteorológicas.
- A iluminação artificial é utilizada em sua totalidade apenas em quatro zonas que correspondem à área central que não recebe luz natural, e em outras áreas a iluminação artificial só é ativada no entardecer quando não há luz natural suficiente.

3.5.4 Mutação da solução atual

Em cada iteração, uma nova solução é gerada pela mutação da solução atual. Nesta etapa, todas as variáveis de busca são alteradas para gerar a solução candidata. A mutação

ocorre em dois estágios: no primeiro, todas as variáveis de pesquisa, exceto a forma de edificação, são alteradas. Para cada variável, um novo valor é selecionado aleatoriamente, dentre as soluções possíveis, respeitando as condicionantes apresentadas na Tabela 5. Nesta etapa, uma solução candidata pode apresentar as mesmas variáveis da solução atual, pois é possível que no processo de seleção aleatória, a variável selecionada seja a mesma que a variável de solução atual.

A segunda etapa ocorre na forma de edificação, representada através de uma matriz binária. Um algoritmo de processamento de imagem foi usado para auxiliar na criação de soluções candidatas. Esta etapa consiste na realocação do elemento aleatório da matriz com valor 1, presente no envoltória da edificação, para um elemento aleatório com valor 0 adjacente ao envoltória. Para encontrar todos os elementos com valores 1 presentes no envoltória, o algoritmo de detecção de contorno da imagem foi usado, então um desses elementos é selecionado aleatoriamente para a realocação.

Para encontrar os elementos 0 adjacentes ao envoltória da edificação, o processo de dilatação da imagem foi realizado na matriz de solução atual e um elemento 0 deste resultado foi selecionado para receber o elemento previamente selecionado com o valor 1. Finalmente, os valores escolhidos são substituídos, gerando uma nova matriz. A Figura 10, na área de mutação, apresenta um exemplo de como a mutação ocorre. Ao contrário da primeira etapa, a matriz gerada será sempre diferente da matriz da solução atual, garantindo que todas as soluções geradas pela mutação sejam diferentes da solução atual. Ao final deste processo, uma nova solução é criada e comparada com a solução atual nas etapas a seguir, até a etapa de arquivamento, no processo evolutivo do algoritmo PAES.

3.5.5 Processo de Arquivamento

Esta etapa consiste em comparar as soluções candidatas com o arquivo externo e com a solução atual. Inicialmente, a solução candidata, que não foi dominada pela solução atual, é comparada a cada membro do arquivo. Se algum membro dominar a solução candidata, ele será descartado. Se ele dominar um ou mais membros do arquivo, todos os membros dominados serão excluídos do arquivo e a solução candidata será arquivada e aceita, substituindo a solução atual. Se a solução candidata não for dominada pelo arquivo e se o arquivo não estiver cheio, ele será arquivado, caso contrário, o parâmetro de diversidade da solução candidata será analisado para seu arquivamento e/ou aceitação (Knowles, et al., 1999).

O parâmetro de diversidade utilizado pelo PAES consiste em dividir o espaço de busca em regiões e analisar a quantidade de elementos presentes em cada região. As regiões são

divididas de acordo com o número de objetivos do problema. Se a solução candidata estiver presente em uma região menos populosa do que qualquer membro do arquivo, ela será arquivada e o membro da região mais populosa será removido (Knowles, et al., 1999). Essa lógica é a mesma usada para aceitar a solução candidata, se estiver em uma região menos congestionada do que a solução atual.

Neste Capítulo foi apresentado um modelo de otimização baseado em simulação para auxiliar os profissionais de projeto na definição da morfologia ótima da envoltória da edificação, em fase de partido arquitetônico, visando o desempenho sustentável de múltiplos objetivos. No Capítulo seguinte é apresentado um estudo de caso igual em quatro regiões brasileiras com climas distintos, a fim de testar a metodologia. Os resultados foram gerados considerando diversos critérios para validar o método proposto.

CAPÍTULO 4 - VALIDAÇÃO

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso igual em quatro regiões brasileiras com climas distintos, a fim de testar a metodologia. Os resultados foram gerados considerando diversos critérios para validar o método proposto.

4.1 Descrição do estudo de caso

O estudo de caso consiste na aplicação do modelo de otimização proposto para gerar um partido arquitetônico de uma edificação comercial com área de 500m², distribuído em 2 andares, simulado para 4 diferentes climas. Uma matriz 5x5 deve ser adotada como região de busca factível, porque é equivalente ao tamanho de terreno do estudo de caso, que corresponde a 625 m². Este cálculo é feito com base no tamanho do módulo geométrico que mede 5x5 metros (tamanho médio de um compartimento), ou seja, cada lado da região factível representa 25 metros e para se ter a metragem quadrada de um quadrado de 25 x 25 basta multiplicar os dois lados, que equivale a 625 m². Estas condições de projeto foram usadas para os quatro casos, exceto o arquivo de clima e a configuração do dia do projeto no módulo geométrico. Para cada condição climática, o menor custo construtivo e soluções eficientes energeticamente devem ser encontradas. A Tabela 8 apresenta a configuração dos módulos geométricos correspondentes a cada clima, que serão utilizados em cada uma das quatro execuções.

Tabela 8 - Configurações fixas do módulo geométrico

Item	Frio - (Curitiba)	Levemente frio - (Florianópolis)	Ligeiramente quente (Campo Grande)	Quente - (Belém)
Tamanho da área	5,0x5,0 m	5,0x5,0 m	5,0x5,0 m	5,0x5,0 m
Tamanho das janelas	3,5x1,2 m	3,5x1,2 m	3,5x1,2 m	3,5x1,2 m
Sombreamento das aberturas	3,5x1,2x0,7 m	3,5x1,2x0,7 m	3,5x1,2x0,7 m	3,5x1,2x0,7 m
Pessoas	3 por zona	3 por zona	3 por zona	3 por zona
Iluminação	10 W/m ²	10 W/m ²	10 W/m ²	10 W/m ²
Equipamentos elétricos	5,4 W/m ²	5,4 W/m ²	5,4 W/m ²	5,4 W/m ²
Sistema de climatização	Aquecim. e Resfriam.	Aquecim. e Resfriam.	Resfriamento	Resfriamento
	VAV	VAV	VAV	VAV
	COP 5 W/W	COP 5 W/W	COP 5 W/W	COP 5 W/W

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 9 apresenta os parâmetros de otimização inseridos pelo usuário, de acordo com as condicionantes descritas. Foram realizadas quatro execuções, uma para cada clima, utilizando os módulos geométricos de cada cidade e seus respectivos arquivos climáticos. Os arquivos meteorológicos foram coletados do INMET (INMET - Instituto Nacional de Meteorologia) (Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil), disponível no diretório (<http://climate.onebuilding.org/>)

Tabela 9 - Entradas do usuário do estudo de caso

Item	Entradas do usuário
Arquivo climático	.epw
Dimensões do "Módulo Geométrico" (X, Y, Z)	5,0x5,0x3,0 m
Número de módulos geométricos, horizontalmente (área útil)	10
Número de módulos geométricos, verticalmente (número de andares)	2
Número máximo de janelas por "Módulo geométrico"	1
Pesquisa de região factível (número de linhas e colunas da matriz)	5x5

Fonte: elaborado pelo autor

Finalmente, o projetista deve tomar a decisão sobre qual solução da Fronteira de Pareto escolher, visando a solução mais eficiente em termos energéticos que atenda às restrições financeiras do investidor. Neste estudo de caso, o investidor não tem restrições sobre o custo construtivo e prioriza a meta de minimizar a energia, como estratégia de marketing para potencializar suas vendas. Alguns outros objetivos também podem influenciar a tomada de decisão sobre qual solução ótima de partido arquitetônico adotar, como o acesso, as barreiras físicas ao meio ambiente, a busca por melhor setorização de atividades e estética.

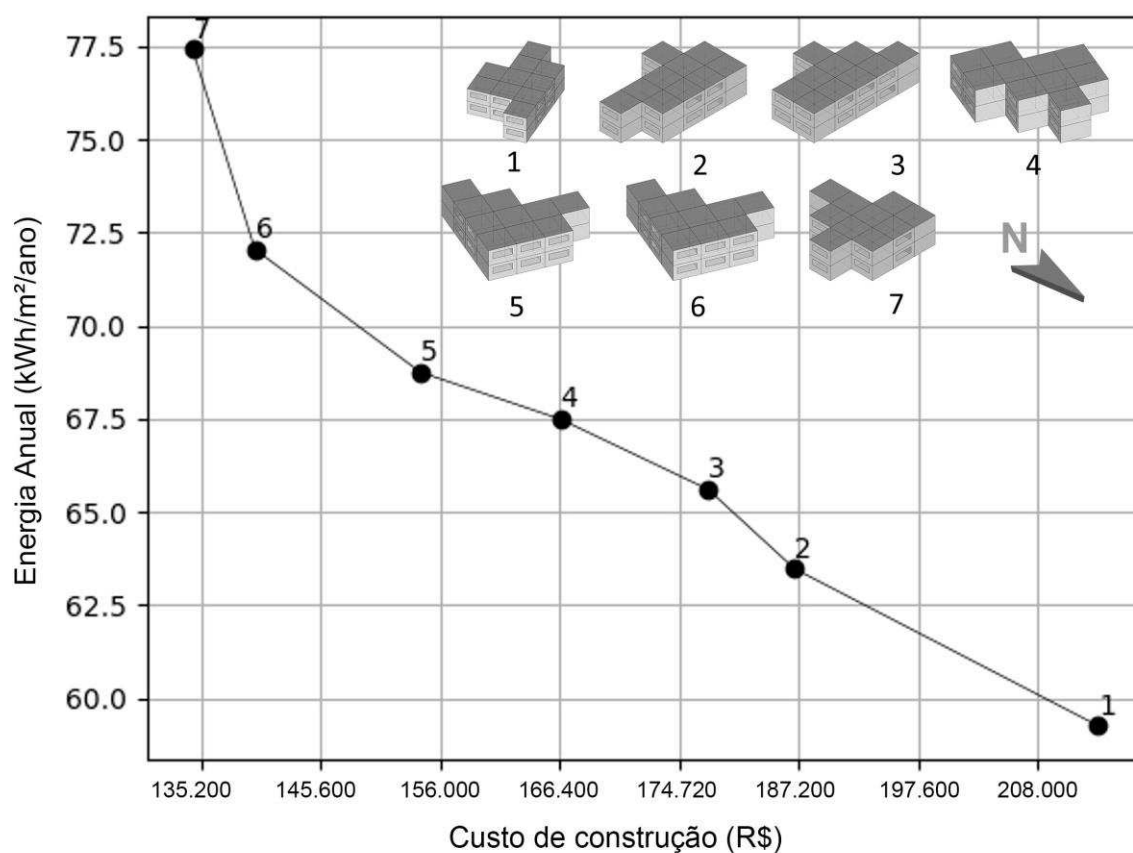
4.2 Resultados da otimização para os 4 climas versus princípios bioclimáticos

Como já foi mencionado, este estudo de caso visa encontrar as soluções ótimas de partido arquitetônico da mesma situação de projeto para 4 climas distintos: frio (Curitiba), levemente frio (Florianópolis), levemente quente (Campo Grande) e quente (Belém), respectivamente. As execuções são apresentadas nas Figuras de 12 a 15, que representam as soluções ótimas de partido arquitetônico. Nas figuras cada ponto da Fronteira de Pareto tem a sua respectiva ilustração tridimensional de partido arquitetônico que está localizada logo acima de forma numerada. As Tabelas de 11 a 14 contém o detalhamento das estratégias arquitetônicas das soluções ótimas para cada Fronteira de Pareto, dentre as quais podemos citar: Paredes externas, paredes internas, cobertura, pisos, janelas, sombreamento das aberturas e orientação (°). Estas tabelas também dispõe do desempenho que as soluções ótimas atingiram (Fitness), referente ao

Consumo de Energia anual (kWh / m² / ano) e Custo de construção (R\$) de cada solução ótima. A seguir, o desempenho de cada execução será analisado para verificar se as soluções ótimas são condizentes com os princípios de Arquitetura Bioclimática contidas em (Lamberts, et al., 2014), bem como o desempenho financeiro de cada execução e possíveis implicações que o processo de otimização venha a apresentar nas soluções resultantes. Isto possibilitará a validação do modelo proposto para a finalidade que se destina.

A Figura 12 e a Tabela 10 representam as soluções de partido arquitetônico para o clima frio (Curitiba). Houve uma grande variação entre materiais leves, médios e pesados – isso pode ser explicado porque Curitiba tem as 4 estações bem definidas, causando a convergência do algoritmo de forma variada porque o mesmo tenta encontrar a melhor solução em meio a 4 condições climáticas distintas. As orientações e as formas de edificação também variam bastante porque cada solução está sujeita a objetivos conflitantes e fatores climáticos que exigem do algoritmo uma readequação de todas as variáveis de busca para minimizar o uso de energia e custo construtivo, simultaneamente. O consumo de energia anual (kWh / m² / ano) das soluções ficou entre 59,25 e 77,42 e o custo de construção (R\$) ficou entre 134.419,83 e 213.263,40. Este clima demandou menor investimento pela ausência da necessidade de proteções solares nas aberturas, embora tenha selecionado materiais pesados que, são mais caros. Em suma, o consumo energético para aquecimento é amenizado pela inércia térmica para aquecimento proporcionada pelos materiais pesados e pelo aquecimento solar passivo que a ausência de sombreamento proporciona, resultando, portanto, no melhor desempenho energético e financeiro dos 4 climas analisados, o que resulta em um menor consumo de aquecimento artificial.

Figura 12 - Fronteira de Pareto - Clima frio



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 10 - Características das soluções ótimas - Clima frio

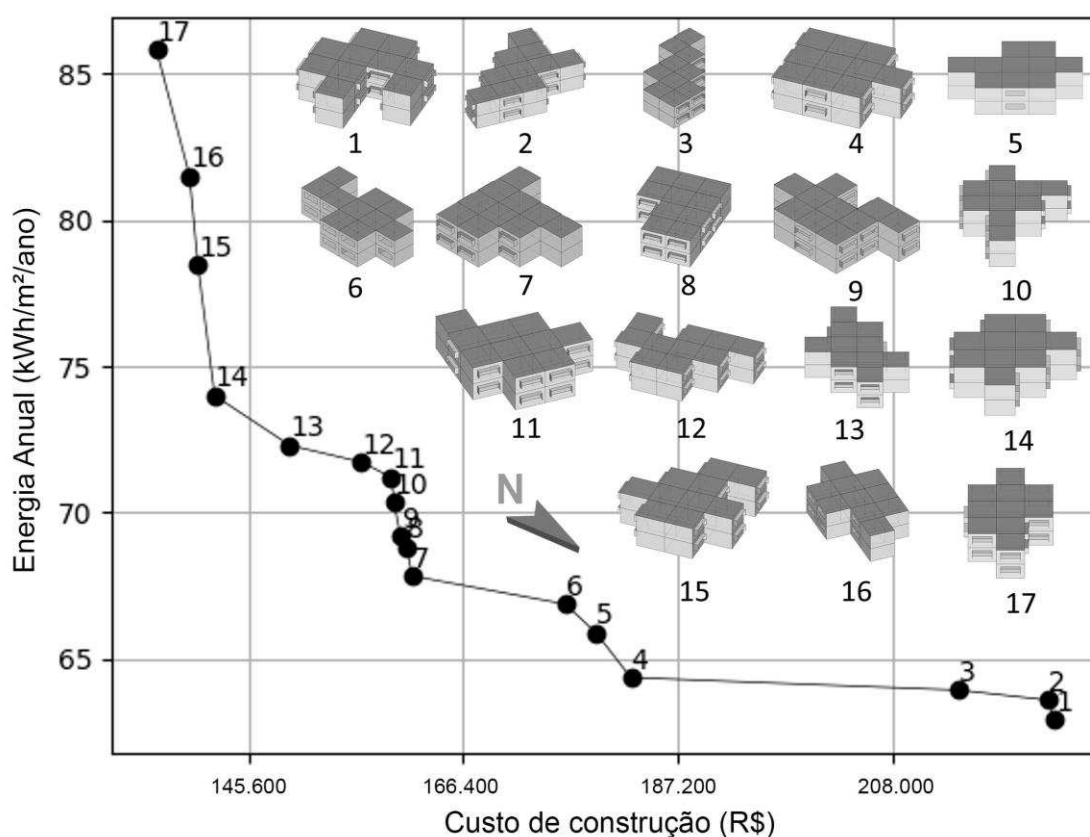
Solução ótima	Fitness		Materiais					Sombrear aberturas	Orientação (°)
	Energia anual (kWh / m² / ano)	Custo de construção (R\$)	Paredes externas	Paredes internas	Cobertura	Pisos	Janelas		
1	59,25	213.263,40	Pesado	Pesado	Pesado	Pesado	Pesado	Não	22,5
2	63,47	186.823,27	Pesado	Leve	Leve	Leve	Pesado	Não	0
3	65,6	179.301,24	Médio	Leve	Pesado	Médio	Pesado	Não	0
4	67,49	166.428,04	Médio	Leve	Pesado	Pesado	Leve	Não	337,5
5	68,75	154.241,61	Médio	Pesado	Pesado	Leve	Leve	Não	247,5
6	72,05	139.844,47	Leve	Pesado	Pesado	Leve	Leve	Não	315
7	77,42	134.419,83	Leve	Leve	Leve	Leve	Leve	Não	180

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 13 e a Tabela 11 representam as soluções de partido arquitetônico para o clima levemente frio (Florianópolis). Houve uma predominância de materiais médios e pesados nos elementos de vedação externos, que favorecem o atraso térmico demorado - o calor é armazenado na envoltória, durante o dia e despejado no ambiente interior durante a noite, o que é desejável para climas com grande amplitude térmica diária. Quase todas as soluções as soluções apresentaram sombreamento nas aberturas, que, diferente do clima frio, tem a

necessidade de ganhar menos calor para economizar com aquecimento artificial. Isto também pode ser explicado porque Florianópolis possui estações de verão e inverno bem definidas. Embora não seja possível definir uma estratégia específica para cada estação, o algoritmo busca a solução que satisfaça o melhor desempenho durante todo o ano. As orientações e as formas de edificação variam bastante porque cada solução está sujeita a objetivos conflitantes e fatores climáticos que exigem do algoritmo uma readequação de todas as variáveis de busca para minimizar o uso de energia e custo construtivo, simultaneamente. O consumo de energia anual ($\text{kWh} / \text{m}^2 / \text{ano}$) das soluções ficou entre 62,92 e 85,81 e o custo de construção (R\$) ficou entre 136.730,96 e 223.744,52. Este clima demandou o maior investimento de todos os climas pela necessidade de proteções solares nas aberturas e materiais pesados, que são mais caros. Em suma, o consumo energético para aquecimento é amenizado pela alta inércia térmica proporcionada pelos materiais pesados, ao passo que o sombreamento nas aberturas auxilia na redução da carga térmica na estação de verão, embora apresente um consumo um pouco mais elevado em relação ao climas frio, o que resulta em um maior consumo um pouco maior de aquecimento artificial.

Figura 13 - Fronteira de Pareto - Clima levemente frio



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 11 - Características das soluções ótimas - Clima levemente frio

Solução ótima	Fitness		Materiais					Sombrear aberturas	Orientação (°)
	Energia anual (kWh / m ² / ano)	Custo de construção (R\$)	Paredes externas	Paredes internas	Cobertura	Pisos	Janelas		
1	62,92	223.744,52	Pesado	Pesado	Pesado	Pesado	Pesado	Sim	292,5
2	63,6	223.059,37	Pesado	Pesado	Pesado	Pesado	Pesado	Sim	157,5
3	63,94	214.396,17	Pesado	Pesado	Pesado	Médio	Pesado	Sim	270
4	64,37	182.656,66	Pesado	Leve	Pesado	Pesado	Médio	Sim	112,5
5	65,9	179.286,52	Médio	Pesado	Pesado	Médio	Pesado	Não	135
6	66,88	176.299,14	Pesado	Leve	Pesado	Médio	Leve	Não	0
7	67,84	161.463,83	Médio	Pesado	Pesado	Médio	Leve	Sim	180
8	68,83	160.974,69	Médio	Leve	Pesado	Médio	Médio	Sim	202,5
9	69,2	160.353,11	Médio	Leve	Pesado	Médio	Leve	Sim	90
10	70,36	159.726,49	Médio	Pesado	Pesado	Leve	Médio	Sim	315
11	71,21	159.474,06	Leve	Leve	Pesado	Pesado	Médio	Sim	67,5
12	71,73	156.575,83	Médio	Pesado	Pesado	Leve	Leve	Sim	112,5
13	72,3	149.646,43	Médio	Leve	Pesado	Leve	Leve	Sim	225
14	74	142.361,94	Leve	Pesado	Leve	Médio	Médio	Sim	135
15	78,47	140.741,20	Leve	Leve	Leve	Médio	Leve	Sim	112,5
16	81,51	139.930,59	Leve	Leve	Leve	Médio	Leve	Não	157,5
17	85,81	136.730,96	Leve	Leve	Médio	Leve	Leve	Sim	45

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 14 e a Tabela 12 representam as soluções de partido arquitetônico para o clima levemente quente (Campo Grande). Houve uma predominância de materiais leves e médios, caracterizados por atraso térmico rápido - o calor entra e sai de forma mais rápida, o que é desejável para climas que exigem redução de ganhos térmicos para economizar com ar condicionado – que é o caso de Campo grande, por apresentar verão mais longo que o inverno. Quase todas as soluções apresentaram sombreamento nas aberturas o que também auxilia na redução da carga térmica. As orientações e as formas de edificação variam bastante porque cada solução está sujeita a objetivos conflitantes e fatores climáticos que exigem do algoritmo uma readequação de todas as variáveis de busca para minimizar o uso de energia e custo construtivo, simultaneamente. O consumo de energia anual (kWh / m² / ano) das soluções ficou entre 51,53 e 70,83 e o custo de construção (R\$) ficou entre 134.419,83 e 184.586,36. Este clima demandou investimento moderado pela necessidade de proteções solares nas aberturas, embora tenha selecionado materiais leves, que são mais baratos. Em suma, o consumo energético para resfriamento é amenizado pela baixa inércia térmica dos materiais leves e pelo sombreamento nas aberturas, embora apresente um consumo mais elevado em relação aos climas anteriores pelo aumento da temperatura, o que resulta em um maior consumo de ar condicionado.

Figura 14 - Fronteira de Pareto - Clima levemente quente

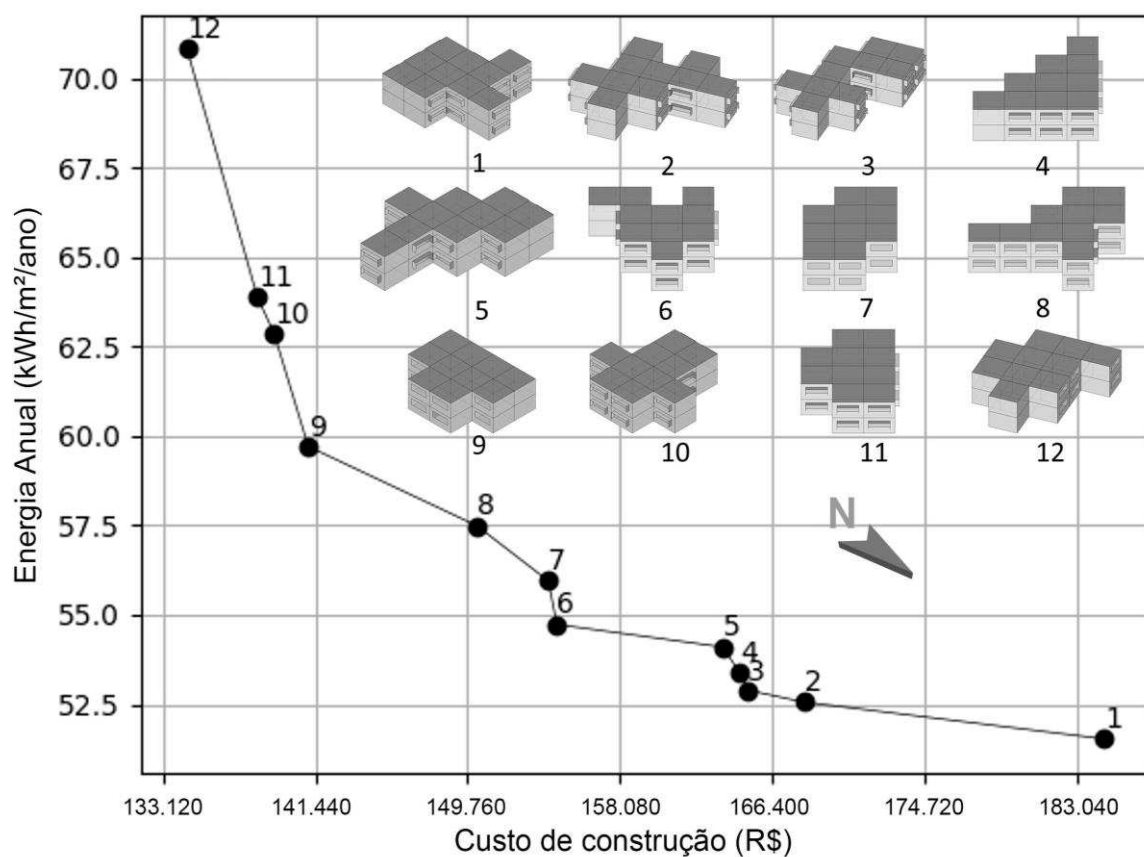


Tabela 12 - Características das soluções ótimas - Clima levemente quente

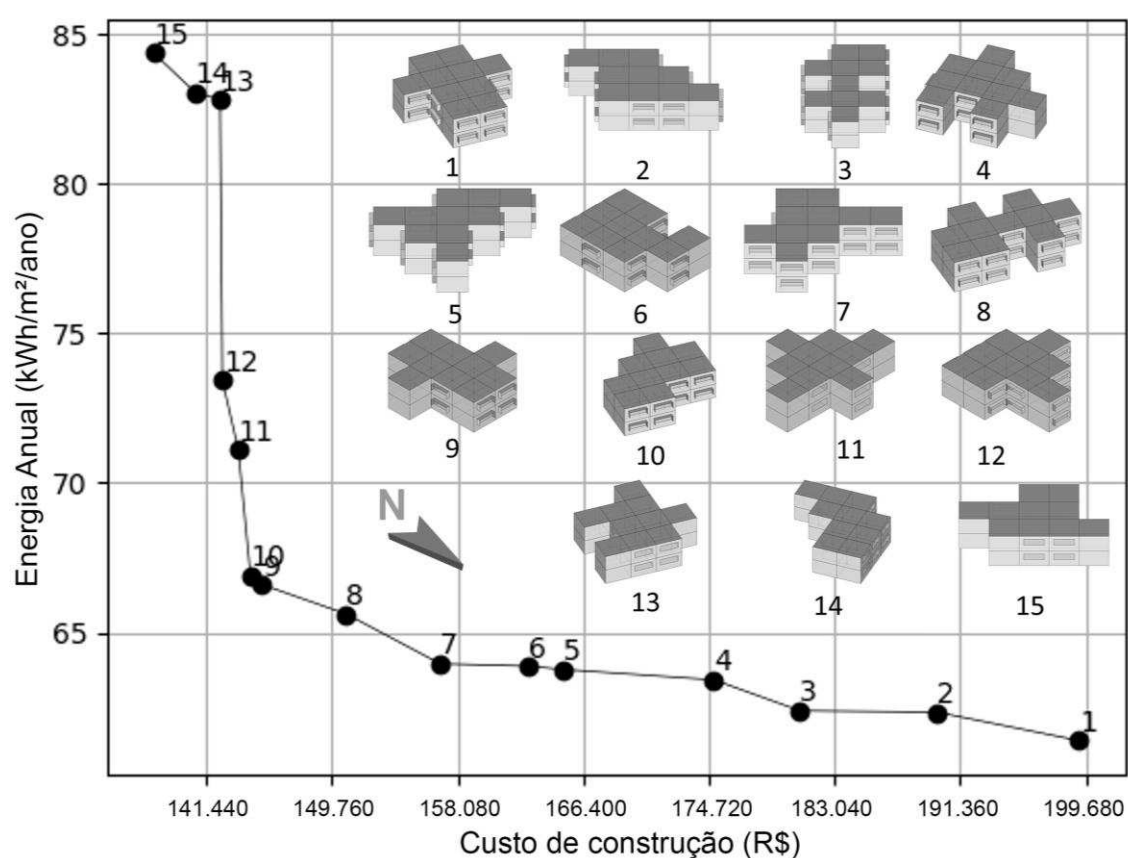
Solução ótima	Fitness		Materiais					Sombrear aberturas	Orientação (°)
	Energia anual (kWh / m² / ano)	Custo de construção (R\$)	Paredes externas	Paredes internas	Cobertura	Pisos	Janelas		
1	51,53	184.586,36	Pesado	Pesado	Pesado	Médio	Médio	Sim	90
2	52,56	168.153,19	Médio	Pesado	Pesado	Médio	Médio	Sim	292,5
3	52,89	165.103,08	Médio	Leve	Pesado	Médio	Médio	Sim	292,5
4	53,39	164.623,85	Médio	Leve	Pesado	Médio	Médio	Sim	225
5	54,1	163.722,71	Médio	Pesado	Pesado	Médio	Leve	Sim	0
6	54,73	154.646,34	Leve	Pesado	Pesado	Médio	Médio	Sim	225
7	55,95	154.179,71	Médio	Pesado	Leve	Médio	Médio	Não	225
8	57,49	150.281,25	Leve	Pesado	Leve	Médio	Médio	Sim	45
9	59,71	141.053,74	Leve	Leve	Leve	Médio	Médio	Não	180
10	62,86	139.191,19	Leve	Leve	Pesado	Leve	Leve	Sim	0
11	63,91	138.259,31	Leve	Leve	Leve	Leve	Médio	Sim	225
12	70,83	134.419,83	Leve	Leve	Leve	Leve	Leve	Não	292,5

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 15 e a Tabela 13 representam as soluções de partido arquitetônico para o clima quente (Belém). Houve uma predominância de materiais leves e médios, caracterizados por atraso térmico rápido - o calor entra e sai de forma mais rápida, o que é desejável para climas

que exigem redução de ganhos térmicos para economizar com ar condicionado – que é o caso de Belém, por representar uma das cidades mais quentes do Brasil. Quase todas as soluções apresentaram sombreamento nas aberturas o que também auxilia na redução da carga térmica. As orientações e as formas de edificação variam bastante porque cada solução está sujeita a objetivos conflitantes e fatores climáticos que exigem do algoritmo uma readequação de todas as variáveis de busca para minimizar o uso de energia e custo construtivo, simultaneamente. O consumo de energia anual ($\text{kWh} / \text{m}^2 / \text{ano}$) das soluções ficou entre 61,39 e 84,36 e o custo de construção (R\$) ficou entre 137.965,03 e 199.264,17. Em relação ao aspecto financeiro este clima demandou investimento moderado pela necessidade de proteções solares nas aberturas, embora tenha selecionado materiais leves, que são mais baratos. Em suma, o consumo energético para resfriamento é amenizado pela baixa inércia térmica dos materiais leves e pelo sombreamento das aberturas, embora apresente o consumo mais alto de todos os climas pelas altas temperaturas de Belém, o que resulta em um maior consumo de ar condicionado.

Figura 15 - Fronteira de Pareto - Clima quente



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 13 - Características das soluções ótimas - Clima quente

Solução ótima	Fitness		Materiais					Sombrear aberturas	Orientação (°)
	Energia anual (kWh / m² / ano)	Custo de construção (R\$)	Paredes externas	Paredes internas	Cobertura	Pisos	Janelas		
1	61,39	199.264,17	Pesado	Pesado	Pesado	Médio	Pesado	Sim	67,5
2	62,34	189.842,27	Médio	Pesado	Pesado	Médio	Pesado	Sim	135
3	62,39	180.761,36	Pesado	Leve	Pesado	Médio	Médio	Sim	315
4	63,42	175.068,11	Médio	Leve	Leve	Médio	Pesado	Sim	202,5
5	63,77	165.027,37	Médio	Pesado	Leve	Médio	Médio	Sim	315
6	63,88	162.768,49	Médio	Pesado	Leve	Médio	Médio	Sim	270
7	63,96	156.930,97	Médio	Leve	Leve	Médio	Médio	Sim	45
8	65,62	150.728,49	Leve	Pesado	Pesado	Médio	Médio	Sim	67,5
9	66,6	145.156,63	Leve	Pesado	Leve	Médio	Leve	Sim	270
10	66,9	144.381,20	Leve	Leve	Pesado	Médio	Leve	Sim	247,5
11	71,12	143.570,59	Leve	Leve	Pesado	Médio	Leve	Não	270
12	73,42	142.522,06	Leve	Leve	Pesado	Leve	Médio	Sim	90
13	82,81	142.362,56	Leve	Pesado	Leve	Leve	Leve	Não	247,5
14	83,04	140.727,27	Leve	Leve	Pesado	Leve	Leve	Não	112,5
15	84,36	137.965,03	Leve	Leve	Médio	Leve	Leve	Não	315

Fonte: elaborado pelo autor

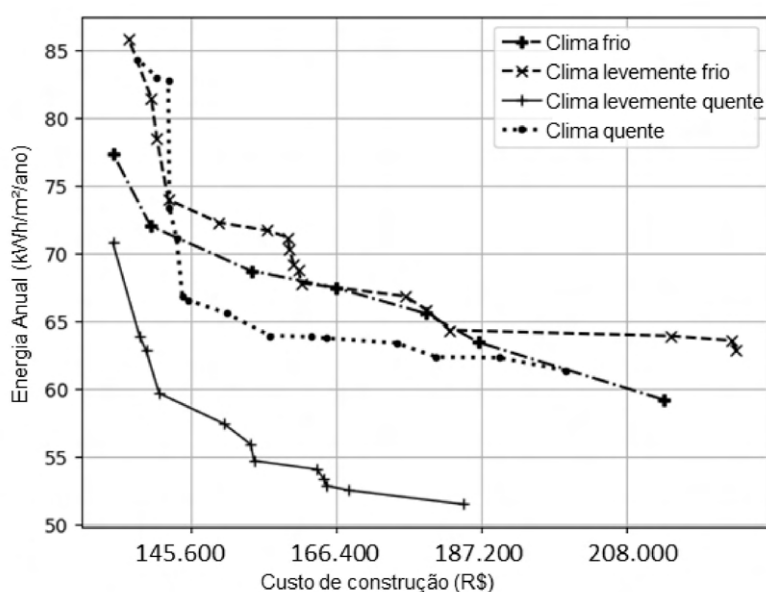
Com os resultados detalhados, pôde-se perceber que o algoritmo gera soluções de Arquitetura Bioclimática condizentes com as necessidades de cada clima, o que o torna válido para o objetivo que se propõe, que é proporcionar eficiência energética por meio de um conjunto de estratégias arquitetônicas passivas, de acordo com diferentes climas. Cada uma destas estratégias de projeto possui um custo construtivo que foi configurado previamente no EnergyPlus. Deste modo, o algoritmo de otimização realiza o processo de busca visando a solução que obtenha o menor consumo de energia e o menor custo construtivo, simultaneamente. O número de soluções geradas em cada Fronteira de Pareto não é constante, podendo resultar em mais ou menos soluções ótimas, independente do clima pois isso depende do processo iterativo do processo evolutivo. Além disso os materiais podem resultar em soluções aparentemente não condizentes com o clima pelo fato da orientação da edificação demandar um isolamento diferente do convencional. As Fronteiras de Pareto apresentam sempre um decaimento porque os objetivos de energia e custo são conflitantes o que ocasiona uma dispersão entre as soluções ótimas, ou seja, a solução mais cara é a que possui o menor consumo de energia e vice-versa. Isso acontece porque, em climas tropicais como os do Brasil, para se conseguir um consumo de energia anual menor com climatização artificial é necessário um investimento maior em estratégias arquitetônicas passivas. Este antagonismo requer a tomada de decisão sobre qual objetivo/solução ótima priorizar, conforme será apresentado na seção seguinte.

4.3 Tomada de decisão sobre qual solução ótima escolher para os 4 climas

Após apresentar de forma detalhada os resultados das Figuras de 12 a 15 / Tabelas de 11 a 14, estas Fronteiras de Pareto foram sobrepostas em um único gráfico, apresentado na Figura 16, para uma melhor visualização da diferença de desempenho energético e financeiro entre os climas, bem como para a tomada de decisão sobre qual solução irá ser adotada pelo projetista em cada um dos climas, levando em consideração os objetivos conflitantes de consumo de energia e custo construtivo e as possibilidades financeiras do investidor.

É sempre desejável a escolha da solução que apresente o menor consumo de energia, pois, como vimos na literatura, é a fase que representa o maior impacto econômico, energético e ambiental. No entanto, nem sempre o investidor dispõe do recurso financeiro para tal; neste caso, para obter uma boa relação custo-benefício, deve-se escolher a solução que apresente o mínimo de consumo possível dentro do que o investidor pode pagar. É importante frisar que mesmo que o investidor não escolha a solução mais eficiente energeticamente, ele estará escolhendo uma solução bem melhor do que uma solução de projeto não otimizada escolhida pelo método por tentativa e erro, como é realizado pela maioria dos projetistas. A Figura 16 apresenta a sobreposição das 4 Fronteiras de Pareto analisadas na seção anterior. Pode-se observar que no clima levemente quente as soluções ótimas alcançaram menores custos de construção e consumo de energia, ao contrário do clima ligeiramente frio que atingiu níveis mais altos de eficiência energética associados a menor custo construtivo. O clima quente foi o segundo mais econômico, seguido pelo clima frio, em energia anual e custo de construção.

Figura 16 - Frentes Pareto sobrepostas de 4 climas analisados



Fonte: elaborado pelo autor

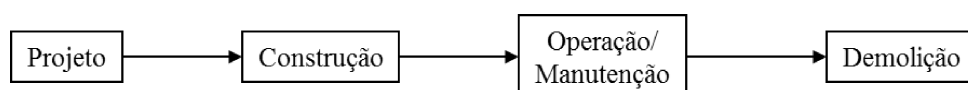
Considera-se, neste estudo de caso, que o investidor está disposto a pagar pela solução que ofereça o melhor custo-benefício considerando o ciclo de vida da edificação, priorizando portanto a Eficiência Energética. Embora o investimento seja um pouco maior, o seu cliente será beneficiado com uma edificação energeticamente mais eficiente em toda a fase operação. Portanto, a solução 1 foi escolhida para todos os climas, porque, apesar de ter o maior custo construtivo, é a mais eficiente em termos energéticos. Para verificar o quão eficaz é a metodologia proposta nesta tese, as soluções ótimas 1 foram submetidas a diversos critérios de análise, a fim de validar o modelo de acordo com a necessidade dos projetistas, no que se refere ao seu desempenho sobre as metas de projeto, usabilidade e precisão da ferramenta. Estas análises foram realizadas para verificar se as soluções otimizadas e modelo de otimização estão de acordo com os resultados ideais em relação aos seguintes critérios:

- Desempenho energético e econômico das soluções ótimas versus edificação de referência
- Desempenho energético das soluções ótimas versus Benchmark brasileiro
- Modelo de otimização versus usabilidade
- Modelo de otimização versus precisão

4.4 Desempenho energético e econômico das soluções ótimas versus edifício de referência

O ciclo de vida de uma edificação é o período desde a sua concepção até o fim de sua vida útil ou demolição. O ciclo de vida inclui as fases de projeto, construção, ocupação, uso e manutenção e demolição. Este processo quantifica e avalia o fluxo de material e energia no sistema (Scheuer, et al., 2003), (Djuric, et al., 2009) e (Jusselme, et al., 2018). A Figura 17 descreve as fases do ciclo de vida de uma edificação.

Figura 17 - Ciclo de vida da edificação



Fonte: (Pacheco, et al., 2012)

Para justificar a seleção das melhores opções de projeto, é essencial combinar custos iniciais e futuros no processo de decisão. A avaliação dos custos do ciclo de vida fornece uma estrutura para combinar custos iniciais e custos futuros em uma única medida combinada, denominada valor presente¹⁴. (Pacheco, et al., 2014). A fim de analisar o impacto econômico

¹⁴ O valor presente é uma métrica que combina todos os custos e reduz (ou desconta) os custos que ocorrem no futuro

das funções de custo e energia encontradas pelo modelo de otimização, foi realizada uma Análise de Retorno de Investimento (Fundamentos no Livro (Pullian, et al., 2006)) para verificar o quão rentáveis são as soluções 1 de cada clima. Estas, por sua vez, foram comparadas a um edificação de referência retangular com configuração de módulos geométricos 2x5 com 2 andares, utilizando as mesmas configurações dos módulos geométricos, porém sem materiais isolantes, janelas sem sombreamento e orientação 0, ou seja, um edificação que não incorpora estratégias de projeto passivo.

Os custos considerados na metodologia limitam-se a: alvenaria, cobertura, isolamento térmico, esquadrias, revestimento de paredes, pisos internos, revestimentos de forros. Os demais custos como: serviços preliminares, serviços de terra, fundações, estrutura, rodapés e soleiras, pintura, instalações eletromecânicas e serviços complementares e BDI não foram considerados pois não são considerados elementos de partido arquitetônico, que é o foco desta tese, e demandariam um alto custo computacional. Para determinar o investimento inicial, os custos de materiais da solução ótima 1 foram subtraídos dos custos de materiais da edificação de referência. Este valor foi adicionado ao custo de sombreamento das soluções ótimas 1 para todos os 4 casos. As outras variáveis de busca, como material do piso, material do telhado e orientação da edificação, não alteram seus custos devido à mudança na forma da edificação, portanto, não foram consideradas como investimento.

A tabela 14 apresenta o desempenho energético, financeiro e ambiental das soluções ótimas 1 em relação aa edificação de referência. O consumo de energia primária anual e as emissões de CO₂ foram geradas no EnergyPlus e transferidos para uma planilha de cálculo dos indicadores econômicos. Na primeira etapa, os fluxos de caixa são calculados a partir da economia ótima de energia anual em relação aa edificação de referência. Na segunda etapa, os fluxos de caixa são usados para determinar o VPL (Valor Presente Líquido), a TIR (Taxa Interna de Retorno) e o Payback. Todas as soluções ótimas tiveram um tempo de retorno do investimento inferior a 3 anos, exceto em clima quente que atingiu quase 4 anos, caracterizando um curto período de ROI. Existe uma grande diferença entre TMA e TIR, o que significa um investimento de baixo risco. Observa-se uma redução em média de 50% das emissões de energia e CO₂ em relação à edificação de referência em todos os climas, caracterizando uma grande economia com custo de energia e redução do impacto ambiental. Os níveis elevados de eficiência energética apresentam que a aplicação da metodologia traz ganhos consideráveis para investidores, usuários finais e meio ambiente, caracterizando a validação do modelo no aspecto “desempenho energético, financeiro e ambiental”. Os parâmetros considerados foram:

- Ciclo de vida da edificação: 25 anos
- Uma taxa de inflação para o investimento inicial de 6,29% e 4,5%.
- Tarifa de energia de R\$ 0,58/kWh, com ajuste anual de 7,19%.
- A TMA (Taxa Mínima de Atratividade¹⁵) de 7,36%, com base na SELIC¹⁶

Tabela 14 - Desempenho das soluções ótimas 1 (SO 1) versus edificação de referência

Objetivo	Item	Frio	Levemente frio	Levemente quente	Quente
Energia Anual kWh/m²/ano	Edificação de referência	128,22	144,08	96,59	109,61
	Solução ótima 1	59,25	62,92	51,53	61,39
	Economia energia e CO ₂	54%	56%	47%	44%
Investimento¹⁷ das Estratégias passivas da SO1	Custo dos materiais e sombreamento da SO1 subtraído do Ed. Refer.	R\$ 53.822,75	R\$ 64.303,70	R\$ 37.209,49	R\$ 51.887,35
Retorno de investimento das SO 1 - Selic 6,29%	VPL ¹⁸ - R\$ (SO 1)	R\$ 165.165,27	R\$ 193.397,03	R\$ 105.873,33	R\$ 101.213,13
	TIR ¹⁹ - % (SO 1)	45,53%	44,89%	43,17%	33,32%
	PBS ²⁰ - anos (SO 1)	2,79	2,81	2,88	3,41
	PBD ²¹ - anos (SO 1)	2,82	2,85	2,96	3,71
Retorno de investimento das SO 1 - Selic 4,5%	VPL - R\$ (SO 1)	R\$187.564,13	R\$219.755,56	R\$120.508,35	R\$ 116.872,80
	TIR - % (SO 1)	45,53%	44,89%	43,17%	33,32%
	PBS - anos (SO 1)	2,79	2,81	2,88	3,41
	PBD - anos (SO 1)	2,86	2,90	2,99	3,65

Fonte: elaborado pelo autor

¹⁵ A TMA (Taxa Mínima de Atratividade) serve como parâmetro para investidores estipularem a taxa mínima aceitável para aprovar um projeto. A TIR (Taxa Interna de Retorno) do projeto deve ser maior que a TMA e quanto mais distante estes indicadores estiverem menor o risco do projeto.

¹⁶ SELIC é o Sistema Especial de Liquidação e Custódia no Brasil. É a taxa média ajustada de financiamento diário. Essa taxa básica de juros é o principal instrumento de política monetária utilizado pelo Banco Central (BC) para controlar a inflação.

¹⁷ Investimento em materiais para paredes, materiais para janelas e sombreamento nas janelas.

¹⁸ O VPL (Valor Presente Líquido) é uma medida do lucro calculada subtraindo os valores presentes (VP) das saídas de caixa (incluindo o custo inicial) dos valores correntes de entrada de caixa ao longo de um período de tempo. No projeto de edificações, é a principal motivação dos investidores pois incorpora uma família de funções objetivo comumente usadas que descrevem o desempenho econômico, técnico e os objetivos do usuário.

¹⁹ A TIR (Taxa Interna de Retorno) é a taxa de juros na qual o valor presente líquido de todos os fluxos de caixa (positivos e negativos) de um projeto ou investimento é igual a zero. É usado para avaliar a atratividade de um projeto ou investimento.

²⁰ O PBS (Payback Simples) é o tempo de retorno do investimento sem taxa de juros.

²¹ O PBD (Payback com desconto) é o tempo de retorno do investimento com taxa de juros.

4.5 Desempenho energético das soluções ótimas versus *benchmark* brasileiro

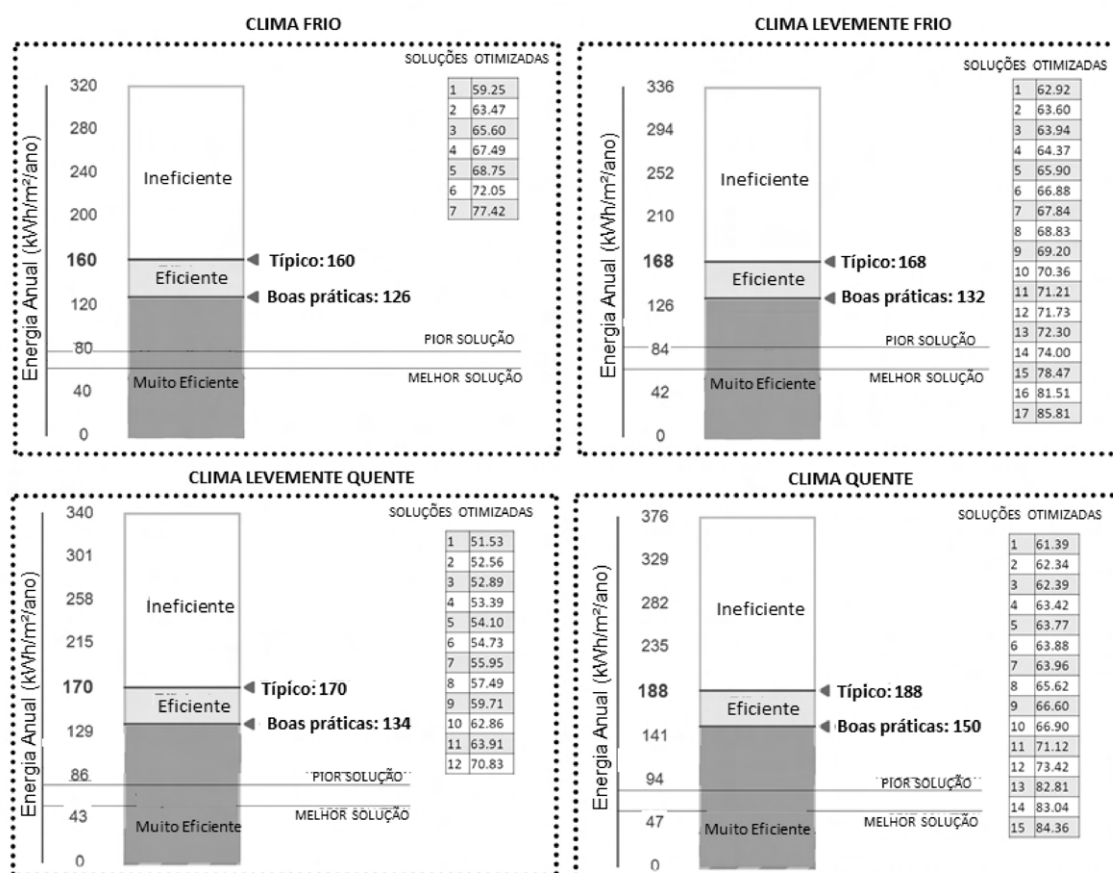
Para verificação dos níveis de eficiência energética alcançados pela metodologia, os resultados das soluções ótimas foram comparados aos níveis estabelecidos pelo *benchmark* de consumo de energia brasileiro. Para a comparação, foi utilizada uma ferramenta de cálculo de consumo desenvolvida Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, disponível em:

http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/plataforma_calculo.html.

Na plataforma, foi considerada a tipologia “edifícios públicos” e foram inseridos dados referentes à localização, consumo anual, área útil, área condicionada, número de funcionários e outras características, mantendo as mesmas configurações de estudo de caso.

A Figura 18 apresenta as capturas de tela apresentando os limites de consumo típico, boas práticas e consumo de soluções ótimas. Verifica-se uma grande diferença (mais de 50%), comparando níveis de consumo típicos com níveis de solução otimizados. Uma explicação possível para isto é que o consumo típico de edificações tem as seguintes limitações: ausência de estratégias de projeto passivo, mal dimensionamento de iluminação e sistemas de ar condicionado, uso de temperaturas artificiais menores que o necessário e uso de iluminação artificial durante o dia pela indisponibilidade de iluminação natural em todos os ambientes da edificação. Portanto, todas essas limitações são resolvidas eficientemente pelo modelo proposto. Todas as soluções otimizadas atingiram o desempenho caracterizado como “Muito Eficiente” com uma ampla margem.

As soluções ótimas 1 obtiveram consumo de energia anual por m² de 59,25 para o clima frio, 62,92 para o clima levemente frio, 51,53 para o clima levemente quente e 61,39 para o clima quente. Conforme apresentado na Figura 18, o consumo típico de energia de edificações públicas do Benchmark é de 160 no clima frio, 168 no clima levemente frio, 170 no clima levemente quente e 188 no clima quente. Estes valores representam uma economia de energia anual de: 37,03% no clima frio, 37,45% no clima levemente frio, 30,31% no clima levemente quente e 32,65% no clima quente, sinalizando o nível “Muito Eficiente” em todos os climas, na plataforma de Benchmark. Estes percentuais de economia em relação à realidade de consumo energético de edificações comerciais brasileiros reafirma a validação do modelo no aspecto “desempenho energético”, analisado na seção anterior por meio da edificação de referência.

Figura 18 - Desempenho energético das soluções ótimas versus *benchmark*

Fonte: elaborado pelo autor

4.6 Modelo de otimização versus usabilidade

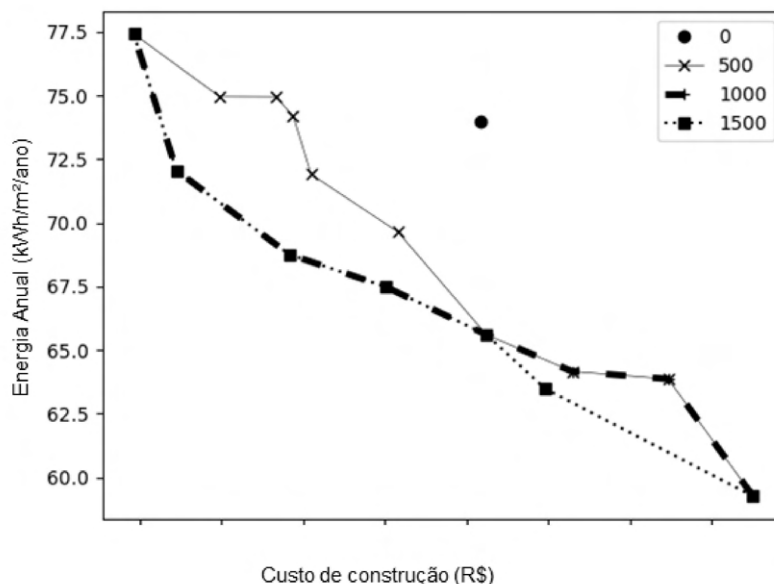
O modelo de otimização apresentou uma usabilidade²² satisfatória pelo fácil uso por entradas do usuário e um bom tempo computacional nas execuções. Para a configuração do estudo de caso, um prédio de tamanho médio (500 m²), a execução do algoritmo levou 6 horas. O algoritmo atingiu a convergência na geração 1000 – número adotado para o critério de parada do algoritmo²³. A Figura 19 apresenta a evolução das soluções de projeto ao longo da geração 1500. Observa-se que os pontos se sobrepõem na geração 1000, sinalizando que o algoritmo parou de evoluir e atingiu sua melhor solução. Esse tempo computacional torna

²² Capacidade da ferramenta de proporcionar um uso acessível ao usuário através de entradas de usuário sem a necessidade de conhecimentos em programação e rapidez na execução da otimização

²³ Para realizar o monitoramento de convergência, recomenda-se realizar algumas execuções adotando um grande número de gerações, para garantir que o algoritmo tenha alcançado a parada evoluindo, atingindo seu ótimo global, evitando mínimos locais.

possível usar o modelo de otimização em escritórios de projeto sem a necessidade de comprar computadores de alto desempenho ou serviços de processamento em nuvem²⁴

Figura 19 - Convergência apresentando a evolução das soluções no tempo frio



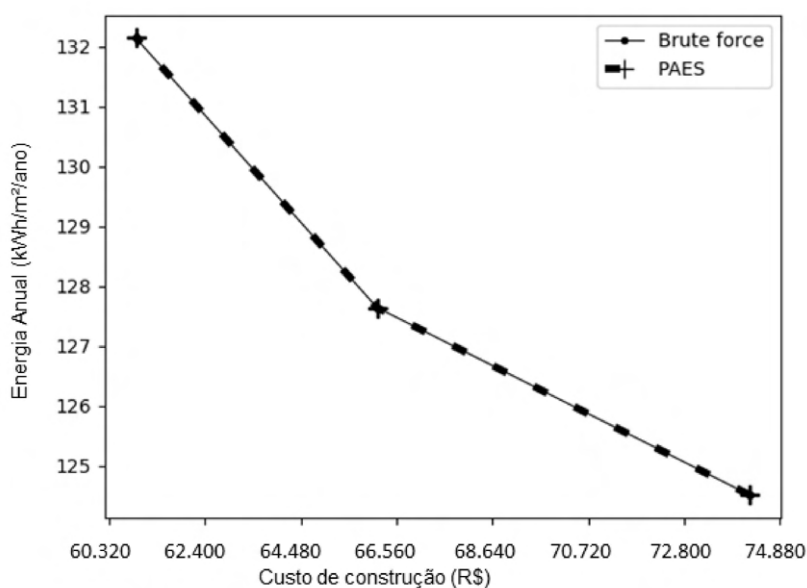
Fonte: elaborado pelo autor

4.7 Modelo de otimização versus precisão

Para verificar a precisão, as soluções ótimas do modelo de otimização proposto (probabilística convergência rápida) foram comparadas com as soluções ótimas do algoritmo Brute Force (determinístico com convergência lenta), que testa todas as possibilidades de solução e garante a melhor solução. Adotou-se a mesma configuração de execução com as variáveis de busca: forma, rotação e materiais de parede para uma matriz 3x3 com 4 módulos geométricos de 2 andares. O algoritmo PAES convergiu com o algoritmo Brute Force em torno da geração 1000. A Figura 20 apresenta uma sobreposição de pontos ótimos do modelo proposto e do algoritmo Brute Force, caracterizando uma margem de erro nulo entre as soluções de fitness. Isso garante que o modelo de otimização proposto encontre a melhor solução com o menor tempo computacional, caracterizando a validação do modelo no aspecto “precisão”.

²⁴ Um computador processador i7 com 8 GB de RAM foi usado. A linguagem de programação foi o Python 2.7.13 e o sistema operacional Linux 17.2.

Figura 20 - Desempenho do modelo proposto versus algoritmo de força bruta (acurácia)



Fonte: elaborado pelo autor

4.8 Discussão dos resultados

Em suma a metodologia mostrou consistência no objetivo que se propõe. Por meio dos diversos critérios de validação foi possível constatar bom desempenho energético e econômico das soluções ótimas, bem como boa usabilidade e precisão do modelo de otimização. Comparando as soluções ótimas com a edificação de referência obteve-se uma economia de energia anual de 54% no clima frio, 56%, no clima levemente frio, 47%, no clima levemente quente e 44% no clima quente. Comparando as soluções ótimas com o consumo típico de energia de edificações públicas brasileiras (Benchmark do CBCS) obteve-se uma economia de energia anual de: 37,03% no clima frio, 37,45% no clima levemente frio, 30,31% no clima levemente quente e 32,65% no clima quente, sinalizando o nível “Muito Eficiente” em todos os climas, na plataforma de Benchmark. Estes percentuais são diretamente proporcionais aos percentuais de emissão de CO₂ poupadas, o que caracteriza uma grande redução no impacto ambiental. Em relação ao aspecto econômico o tempo de retorno de investimento considerando a inflação foi de 2,82 anos no clima frio, 2,85 anos no clima levemente frio, 2,96 anos no clima levemente quente e 3,71 anos no clima quente – ou seja, tempos retorno de curto prazo.

Ressalta-se a importância de ter utilizado a Otimização Multiobjectivo de Pareto ao invés da otimização pelo método da soma ponderada (que reúne todos os objetivos de projeto em uma única função). Isso porque o custo de construção e consumo energético são objetivos conflitantes, ou seja, dependendo do clima, uma solução com menor custo construtivo pode

resultar em maior eficiência energética e vice-versa, o que demanda análise de custo-benefício entre diversas soluções ótimas. Outra vantagem identificada na abordagem da otimização multiobjectivo de Pareto foi a Tomada de Decisão verificando o custo-benefício analisando conjunto de soluções, o que não seria possível através de uma medida combinada de objetivo único (que fornecem apenas uma solução ótima).

Em relação ao custo computacional ressalta-se a importância na escolha do software EnergyPlus para realizar a avaliação das soluções candidatas, visto que proporciona uma série de saídas e tempo de execução viável, além de ser o software mais consolidado no mundo, tanto em pesquisa quanto na indústria de projeto de alto desempenho. Além disso, escolha do algoritmo PAES também desempenhou um papel importante para a redução do tempo de execução da otimização, visto que foi possível economizar com a fase de cruzamento, característica do popular Algoritmo Genético.

Além disso, embora a otimização de Pareto não meça todos os impactos ambientais e custo do ciclo de vida de um edificação (o que demanda um custo computacional inviável e não possibilita a análise de custo benefício) ela se concentra em solucionar os custos e impactos ambientais mais impactantes e duradouros que são provenientes da fase de operação: o consumo de energia e as emissões de CO₂. A união de todos estes fatores resultou em uma boa usabilidade sem abrir mão da sua precisão, que pode ser constatada por meio da comparação com o algoritmo de força bruta que investiga todas as soluções possíveis e fornece o ótimo global com um alto tempo computacional.

Em relação à maneira como o modelo trata os objetivos e condicionantes do projeto, a formulação adequada do problema de otimização forneceu uma série de vantagens em relação às metodologias analisadas na literatura. Dentre as quais destaca-se: (1) os múltiplos resultados ótimos, de acordo com os objetivos conflitantes mais importantes na fase inicial de projeto, o que possibilita além da análise de custo-benefício (energia e custo) a escolha de uma solução que esteja concatenada com outros requisitos de desempenho como: layout, efeitos de sombreamento, vistas panorâmicas, controle de ruído, ventilação natural, utilização da luz do dia e principalmente, o desempenho térmico da edificação; (2) níveis mais altos de eficiência energética, menos emissões de CO₂ e retorno do investimento no curto prazo; (3) facilidade no uso da ferramenta proporcionada por simples entradas do usuário, sem o uso de códigos de programação; velocidade no encontro das soluções otimizadas e espaço de busca em malha que prioriza a economia na construção e proporciona estabilidade estrutural.

Todos esses benefícios caracterizam a validação da metodologia para o partido arquitetônico de edificações, caracterizando uma quebra de paradigmas na metodologia do

processo de projeto, orientada por uma metodologia de otimização para evitar perda de tempo testando soluções em um espaço de busca infinito. Com uma única execução, o projetista pode encontrar as soluções de projeto mais econômicas e a partir de então desenvolver seu senso crítico para escolher a solução que melhor atenda o seu programa de necessidades, servindo como elemento norteador no seu processo criativo subjetivo. Com a adoção dessa técnica no processo de projeto, diversos agentes são beneficiados: sociedade em geral, meio ambiente, usuários, investidores, indústria de projeto e comunidade científica do projeto de edificações. As principais contribuições desta Tese podem ser resumidas em:

a) Contribuições para a sustentabilidade financeira e ambiental:

- Redução considerável de energia anual em relação ao consumo típico;
- Redução considerável nas emissões operacionais de CO₂ em relação as emissões típicas;
- Retorno do investimento a curto prazo em todas as condições climáticas;
- Valorização do imóvel pela maior eficiência energética;
- Ganhos financeiros para investidores e para usuários finais da edificação;
- Redução do impacto ambiental de desmatamento para a criação de usinas hidrelétricas.

b) Contribuições para a indústria e comunidade científica de projeto:

- Subsidiar a fase de “Estudo de Viabilidade de Arquitetura” visando objetivos de desempenho (econômico, ambiental, energético, térmico) e condicionantes (climáticos, físicos, legais e financeiros), característicos do projeto de edificações;
- Fácil de usar, baseado na entrada de dados de projeto pelo usuário;
- Evita perda de tempo dos projetistas, testando várias soluções e garante a melhor solução de desempenho;
- Adoção de matriz 3D para a definição da forma proporciona: compatibilização entre arquitetura, estrutura e instalações, estabilidade estrutural, economia na construção.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

A abordagem apresentada teve como objetivo resolver uma importante lacuna identificada na literatura sobre o estágio inicial do projeto de edificação, que é a fase de maior impacto energético, econômico e ambiental em todo o ciclo de vida da edificação. A fase inicial de projeto ainda vem sendo predominantemente realizada sem objetivos de otimização, resultando em perda de tempo simulando soluções em um espaço de busca infinito, o que geralmente resulta em uma solução que sequer se aproxima do ótimo global. Essa foi a motivação para o desenvolvimento desta abordagem, que implementa a otimização da arquitetura em fase de projeto para combater o desempenho ineficiente dos sistemas artificiais pela falta de otimização das estratégias arquitetônicas passivas.

A criação desta metodologia visa atender as necessidades reais dos projetistas na fase de estudo preliminar de projeto, de acordo com as principais metas e condicionantes, característicos desta fase, buscando acelerar o processo de projeto através da inteligência computacional. Esta abordagem de otimização objetiva encontrar partidos arquitetônicos com menor consumo de energia e o menor custo construtivo, considerando o clima e ocupação do terreno, limitação financeira do investidor. Tais objetivos e condicionantes buscam sanar o desafio encontrado pelo profissional no ato de projetar, levando em consideração os interesses por parte dos investidores e usuários finais, tendo em vista que a fase de projeto reflete nos custos da fase de construção, operação e manutenção.

No estudo de caso, foi possível simular o processo de utilização do modelo de otimização e comparar os resultados com um edificação de referência; níveis de classificação de consumo de energia dos governos; diretrizes de projeto passivo para o bom desempenho econômico, energético, ambiental, usabilidade e precisão computacional, provando que o modelo serve como suporte no estágio inicial do projeto de edificações. As soluções ótimas alcançaram uma considerável de economia de energia e emissão de CO₂ operacional em relação ao consumo típico, bem como retorno do investimento a curto prazo em todas as condições climáticas analisadas. Portanto, a validação da metodologia contemplou os objetivos mais significativos da fase inicial de projeto, com resultados satisfatórios de eficiência energética, financeira, ambiental e computacional.

Esta aplicação visa aliviar o grande impacto ambiental dos edificações nas cidades por causa da alta porcentagem de energia consumida por edificações que são ineficientemente projetados e que sobrecarregam o sistema elétrico internacionalmente. Além de benefícios

econômicos, sociais e ambientais, os projetistas têm a possibilidade de reduzir o tempo de projeto inicial e garantir a melhor solução de desempenho, pela automação parcial deste processo, sem deixar de lado os objetivos particulares do profissional e parâmetros adaptáveis a cada situação de projeto.

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Criação de interface gráfica para o método proposto
- Aplicações de estudos de caso diversas (ex: terrenos irregulares, barreiras de entorno e formas de módulos geométricos diferentes) utilizando a metodologia proposta.
- Inserção de Redes Neurais para reconhecimento de padrões das formas de edificação e Lógica Fuzzy para tomada de decisão multiobjetivo

REFERENCIAS

- Agopyan Vahan, John Vanderley M. e Goldemberg José O** Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil (Volume 5) [Livro]. - [s.l.] : Blucher, 2011.
- Andrade T.** Integração da Análise Ciclo de Vida [Livro]. - Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- ASHRAE** Appendix G of Standard 90.1 [Relatório] : Building Performance Rating Method. - 2010.
- ASHRAE** ASHRAE Handbook Fundamentals [Livro]. - [s.l.] : ASHRAE Research, 2005. - I - P.
- Attia S.** Computational optimisation for zero energy buildings design: interviews results with twenty eight international experts [Conferência] // Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. - Chambéry, France : [s.n.], 2012. - pp. 26-28.
- Autodesk** Revit - Building Information Modelling.
- Bao F. [et al.]** Generating and exploring good building layouts [Conferência] // ACM Transactions on Graphics (TOG) - SIGGRAPH 2013 Conference Proceedings. - New York, NY : [s.n.], 2013. - Vol. 32.
- Bektas B. e Aksoy, U.** Prediction of building energy needs in early stage of design by using ANFIS [Artigo] // Expert Systems with Applications. - [s.l.] : Elsevier. - 5. - Vol. 38. - pp. 5352-5358.
- Berkeley National Laboratory** GenOpt - Generic Optimization Program [Online]. - <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/>.
- Brown N. e Mueller, C.** Design for structural and energy performance of long span buildings using geometric multi-objective optimization [Artigo] // Energy and Buildings. - [s.l.] : Elsevier, 2016. - pp. 748-761.
- Burke E.K** Multi-Objective Optimization: Search methodologies [Livro]. - Springe US : Springer, 2005. - pp. 273-316.
- Caldas L. e Norford, L.** A Genetic Algorithm Tool for Design Optimization [Artigo] // ACADIA . - 1999.
- Caldas L.** Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system [Artigo] // Advanced Engineering Informatics. - [s.l.] : Elsevier, 2008. - 1 : Vol. 22. - pp. 59-70.
- Caruso G. e Kämpf J.H.** Building shape optimisation to reduce air-conditioning needs using constrained evolutionary algorithms. [Artigo] // Solar Energy. - [s.l.] : Elsevier, 2015. - Vol. 118. - pp. 186-196.
- Caruso G., Fantozzi F. e Leccoese F.** Optimal theoretical building form to minimize direct solar irradiation. [Artigo] // Solar Energy. - [s.l.] : Elsevier, 2013. - Vol. 97. - pp. 128-137.

- Chan H. e Riffat S., Zhu, J.** Review of passive solar heating and cooling technologies [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2010. - 14. - pp. 781–789.
- Chan H.Y., Riffat S.B. e Zhu J.** Review of passive solar heating and cooling technologies [Artigo] // Renewable & Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2010. - Vol. 14. - pp. 781-789.
- Chantrelle H. [et al.]** Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings [Artigo] // Applied Energy. - [s.l.] : Elsevier, 2011. - 4, p. 1386-1394 : Vol. 88. - pp. 1386-1394.
- Coakley D., Raftery, P. e Keane, M.** A review of methods to match building energy simulation models to measured data [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2014. - Vol. 37. - pp. 123-141.
- Coello C.A.C. e Lamont G.B.** Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms [Livro]. - [s.l.] : World Scientific, 2004.
- Coello C.A.C., Lamont G.B. e Veldhuizen D.A.V.** Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems [Livro]. - [s.l.] : Springer, 2007.
- Colomi A., Dorigo M. e Manjezzo V.** Genetic algorithms and highly limited problems: the case of schedule. Process of the first international seminar on parallel solution of problems of nature [Conferência] // Process of the first international seminar on parallel solution of problems of nature. - 1990. - pp. 55-59.
- Darwin C.** The Origin of Species [Livro]. - 1859.
- Deb K. [et al.]** A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [Periódico] // IEEE Transactions on Evolutionary Computation . - 2002. - Vol. 6. - pp. 182-197.
- Deb K.** Multi-objective Genetic Algorithms: Problem Difficulties and Construction of Test Problems [Artigo] // Evolut Computer. - [s.l.] : IEEE, 1999. - 3 : Vol. 7. - pp. 205-230.
- Delinski L. e Colmenero J.** Otimização multiobjetivo: uma abordagem conceitual [Conferência] // VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. - Ponta Grossa, PR : [s.n.], 2017.
- Diakaki C. [et al.]** Um modelo de decisão multiobjetivo para a melhoria da eficiência energética nos edifícios [Periódico]. - Energy : [s.n.], 2010. - 12, p. 5483-5496 : Vol. 35.
- Dingwall A.** Testing the impact of using cumulative data with genetic algorithms for the analysis of building energy performance and material cost [Livro]. - Georgia : Georgia Institute of Technology, 2012.
- Dino I.** An evolutionary approach for 3D architectural space layout design exploration [Artigo] // Automation in Construction. - [s.l.] : Elsevier, 2016. - pp. 131-150.
- Dino I. e Üçoluk, G.** Multiobjective Design Optimization of Building Space Layout, Energy, and Daylighting Performance [Artigo] // Journal of Computing in Civil Engineering. - 2017. - Vol. 31.
- Djuric N. e Novakovic V.** Review of possibilities and necessities for building lifetime commissioning [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2009. - Vol. 13. - pp. 486-492.

- EnergyPlus** Documentation [Online]. - 2018. - <https://energyplus.net/documentation>.
- Eve S., David, L. e Gerber, J.** Designing-in performance: A framework for evolutionary energy performance feedback in early stage design [Artigo] // Automation in Construction. - [s.l.] : Elsevier, 2014. - Vol. 38. - pp. 59-73.
- Evins R. [et al.]** A case study exploring regulated energy use in domestic buildings using design-of-experiments and multi-objective optimisation [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2012. - Vol. 54. - pp. 126-136.
- Evins R.** Review of computational optimisation methods applied to sustainable building design [Artigo] // Renewable & sustainable energy reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2013. - Vol. 22. - pp. 230-245.
- Fesanghary M., Asadi S. e Geem Z.W.** Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2012. - Vol. 49. - pp. 245-250.
- Finucane E.. e Derix C.** Evolving urban structures using computer optimisation techniques [Artigo] // Generative Art. - 2006.
- Flager F.** Multi-objective building envelope optimization for life-cycle cost and global warming potential [Conferência] // , in 9th European Conference on Product and Process Modeling / ed. Reykjavik Iceland.. - 2012.
- Fonseca C.M. [et al.]** Evolutionary multi-criterion optimization [Conferência] // 9th International Conference, EMO 2017, Münster, Germany, March 19-22, 2017, Proceedings. - Springer, Berlin : Heidelberg, 2003. - Vol. 2632.
- Goldberg D.E.** Genetic Algorithms in Search [Livro]. - [s.l.] : Addison-Wesley, 1989.
- Guo Z. e Li, B.** Evolutionary approach for spatial architecture layout design enhanced by an agent-based topology finding system [Artigo] // Frontiers of Architectural Research. - [s.l.] : Elsevier, 2017. - Vol. 6. - pp. 53-62.
- Hamdy M., Hasan A. e Siren K.** Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2011. - 1 : Vol. 46. - pp. 109-123.
- Hamdy M., Hasan A. e Siren K.** Impact of adaptive thermal comfort criteria on building energy use and cooling equipment size using a multi-objective optimization scheme [Artigo] // Energy and Buildings. - [s.l.] : Elsevier, 2011. - 9 : Vol. 43. - pp. 2055-2067.
- Hasan A ., Vuolle M e Sirén K.** Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2008. - Vol. 43. - pp. 2022-2034.
- Haupt R.L. e Haupt S.E.** Practical genetic algorithms. 2. ed. [Livro]. - [s.l.] : Wiley, 2004.
- Hearn Fil** Ideas que han configurado edificios [Livro]. - Barcelona : Gustavo Gili, 2006.
- Hearn M. F.** Ideas that shaped buildings [Livro]. - Cambridge, MA : The MIT Press, 2003.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia Weather files [Online]. - <http://climate.onebuilding.org/>.

Jin J.T., Cho H.J. e J.W. Jeong Optimization of freeform building shape using genetic algorithm [Conferência] // Proceedings of 1st IBPSA Asia Conference (ASim2012). - Shanghai, China : [s.n.], 2012.

Jin Q. e Overend M. Facade renovation for a public building based on a whole-life value approach [Conferência] // Proceedings of the 2012 building simulation and optimization, conference, Universidade de Loughborough. - Loughborough : Leicestershire, 2012. - pp. 378-385.

Jones D.F., Mirrazavi S.K. e Tamiz M. Multiobjective meta-heuristics: an overview of the current state-of-the-art [Artigo] // European Journal of Operational Research. - [s.l.] : Elsevier, 2002. - p. 1-9 : Vol. 137.

Jusselme T., Rey, E. e Andersen, M. An integrative approach for embodied energy: Towards an LCA-based data-driven design method [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2018. - Vol. 88. - pp. 123-132.

Kampf J.H. e Robinson D. Optimization of building form for solar energy utilization using constrained evolutionary algorithms [Artigo] // Energy and Buildings. - 2010. - Vol. 42. - pp. 807-814.

Knowles J. e Corne D. Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy [Periódico] // Evolutionary computation. - 2000. - 2 : Vol. 8. - pp. 149-172.

Knowles J. e Corne D. The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Pareto [Conferência] // Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on. - 1999. - pp. 98-105.

Konak A., Coit D.W. e Smith A.E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial [Artigo] // Reliability Engineering & System Safety. - [s.l.] : Elsevier, 2006. - Especial - Algoritmos Genéticos e Confiabilidade : Vols. 91, n. 9. - pp. 992-1007.

Konis K., Gamas, A. e Kensek, K. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support [Artigo] // Solar Energy. - [s.l.] : Elsevier, 2016. - Vol. 125. - pp. 161-179.

Kumar H. A review on modeling and simulation of building energy systems [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2016. - Vol. 56. - pp. 1272-1292.

Labonnote N., Skaar, C. e Rütther, P. The Potential of Decision Support Systems for More Sustainable and Intelligent Constructions: A Short Overview [Artigo] // Procedia Manufacturing. - [s.l.] : Elsevier, 2017. - pp. 33-41.

Lamberts R., Dutra, L. e Pereira, F. Eficiência Energética na Arquitetura [Livro]. - [s.l.] : ELETROBRAS/PROCEL, 2014. - 3.

Lawson B. How designers think: the designthink: the design process demystified [Livro]. - Oxford, UK : Architectural, 1997.

- Lee J.H.** Optimization of indoor climate conditioning with passive and active methods using GA and CFD [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2007. - 9 : Vol. 42. - pp. 3333-3340.
- Li L.** The optimization of architectural shape based on Genetic Algorithm [Artigo] // Frontiers of Architectural Research. - [s.l.] : Elsevier, 2012. - Vol. 1.
- Machairas V., Tsangrassoulis A. e Axarli K.** Algorithms for optimization of building design: a review [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2014. - Vol. 31. - pp. 101-112.
- Malard Maria Lucia** As Aparências em Arquitetura [Livro]. - Belo Horizonte : UFMG, 2006.
- Mascaró Juan Luis** O Custo das Decisões Arquitetônicas [Livro]. - [s.l.] : Masquatro, 2010.
- Michalek J. e Choudhary, R.** Architectural layout design optimization [Artigo] // Engineering Optimization. - 2002. - Vol. 34. - pp. 461-484.
- Nagy D. [et al.]** Project Discover: An Application of Generative Design for Architectural Space Planning [Conferência] // Autodesk University. - Las Vegas : [s.n.], 2017 .
- National Renewable Energy Laboratory** BEopt - Building Energy Optimization Tool [Online]. - <https://beopt.nrel.gov/home>.
- Neves L.** Adoção do partido na Arquitetura [Livro]. - [s.l.] : Centro Editorial e Didático da Universidade Federal da Bahia, 1989.
- Nguyen A.T., Reiter S. e Rigo P.** A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. [Artigo] // Applied Energy. - [s.l.] : Elsevier, 2014. - Vol. 113. - pp. 1043-1058.
- Nielsen A.N., Jensen R.L. e Larsen T.S.** Early stage decision support for sustainable building renovation – A review [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2016. - Vol. 103. - pp. 165-181.
- Nielsen T.R.** Optimization of buildings with respect to energy and indoor environment [Livro]. - [s.l.] : Rapport BYG.DTU R-036, 2002.
- Nisztuk M. e Myszkowski, P.** Usability of contemporary tools for the computational design of architectural objects: Review, features evaluation and reflection [Artigo] // Handbook of Research on Form and Morphogenesis in Modern Architectural Contexts. - 2017.
- Ouarghi R. e Krarti M.** Building Shape Optimization Using Neural Network and Genetic Algorithm Approach [Artigo] // ASHRAE Transactions. - 2006. - 1 : Vol. 112. - pp. 484-491..
- Pacheco F. [et al.]** Eco-efficient Construction and Building Materials: Life Cycle assessment (LCA) eco-labelling and case studies [Livro]. - [s.l.] : Woodhead Publishing, 2014.
- Pacheco R., Ordóñez J. e Martínez G.** Energy efficient design of building: a review [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2012. - 6 : Vol. 16. - pp. 3559-3573.
- Papapavlou A. e Turner A.** Structural evolution: a genetic algorithm method to generate structurally optimal delaunay triangulated space frames for dynamic loads. [Conferência] // 27th eCAADe Conference. - Istanbul : [s.n.], 2009.

Phyton Programming language [Patente].

Pini TCPO - Tabela de composição de preços para orçamento [Relatório]. - [s.l.] : Pini, 2010.

Pullian P. e Phillips P. Return on Investment (ROI) Basics [Livro]. - [s.l.] : Sociedade Americana de Treinamento e Desenvolvimento, 2006.

Pyidf Python library to read, modify and create EnergyPlus files [Online]. - <https://pypi.python.org/pypi/pyidf>.

Rowe P. G Design thinking [Livro]. - Cambridge, MA : The MIT Press, 1992.

Russell A.D. e Arlani G.A. Objective functions for optimal building design [Artigo] // Computer-Aided Design. - [s.l.] : Elsevier, 1981. - 6 : Vol. 13. - pp. 327-338.

Sadineni S.B., Madala S. e Boehm R.F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. [Periódico] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2011. - 8 : Vol. 15. - pp. 3617-3631.

Santos L., Schleicher S. e Caldas L. Automation of CAD models to BEM models for performance based goal-oriented design methods [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2017. - Vol. 112. - pp. 144-158.

Scheuer C., Keoleian G.A. e Reppe P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: challenges, modeling and project implications [Artigo] // Energy and Buildings. - [s.l.] : Elsevier, 2003. - Vol. 35. - pp. 1049-1064.

Schwartz Y. [et al.] Integrated Building Performance Optimisation: Coupling Parametric Thermal Simulation Optimisation and Generative Spatial Design Programming [Conferência] // Building Simulation . - San Francisco, CA : [s.n.], 2017.

Shi X. [et al.] Review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2016. - Vol. 65. - pp. 872-884.

Silva Elvan Uma introdução ao Projeto Arquitetônico [Livro]. - [s.l.] : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991.

Soares N., Bastos J. e Pereira L. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment [Artigo] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2017. - 77. - pp. 845-860.

Soddu C. Visionary Variations of Milano [Online]. - 2005. - <http://soddu2.dst.polimi.it/asialink/de1.htm>.

Sönmez N. A review of the use of examples for automating architectural design tasks [Artigo] // Computer-Aided Design. - [s.l.] : Elsevier, 2018. - Vol. 96. - pp. 13-13.

Tian Z. [et al.] Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review [Artigo] // Energy and Buildings. - [s.l.] : Elsevier, 2018. - Vol. 158. - pp. 1306-1316.

- Tresidder E.** Accelerated optimisation methods for low-carbon building design. Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Institute of Energy and Sustainable Development de Montfort University [Livro]. - [s.l.] : Montfort University, 2014.
- Tuhus-Dubrow D. e Krarti M.** Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2010. - 7 : Vol. 45. - pp. 1574-1581.
- U.S. Department of Energy's (DOE) - Building Technologies Office (BTO) EnergyPlus** - <https://EnergyPlus.net/>.
- VTT Technical Research Center of Finland and AaltoUniversity** MOBO - Multiobjective Building Performance optimization [Online]. - <http://ibpsa-nordic.org/tools.html>.
- Wang J. [et al.]** Particle swarm optimization for redundant building cooling heating and power system [Artigo] // Applied Energy. - [s.l.] : Elsevier, 2010. - 12 : Vol. 87. - pp. 3668-3679.
- Wang W. e Rivard R. Zmeureanu** Floor shape optimization for green building design [Artigo] // Advanced Engineering Informatics. - [s.l.] : Elsevier, 2006. - pp. 363-378.
- Wang W., Zmeureanu R. e Rivard H.** Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2005. - 11 : Vol. 40. - pp. 1512--1525.
- Wetter M. e Polak E.** A convergent optimization method using pattern search algorithms with adaptive precision simulation [Artigo] // Building Services Engineering Research and Technology. - [s.l.] : Berkeley Lab, 2004. - Vol. 25. - pp. 327-338.
- Wetter M. e Wright J.A.** A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization [Artigo] // Building and Environment. - [s.l.] : Elsevier, 2004. - Vol. 39. - pp. 989-999.
- Wetter M. e Wright J.A.** Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method [Conferência] // Proc. of the 8th IBPSA Conference. - Eindhoven, Netherlands : Berkeley Lab, 2003. - pp. 1401-1408.
- Wetter M.** Generic Optimization Program - User's Manual [Relatório]. - [s.l.] : Laboratório Nacional Lawrence Berkeley, 2009.
- Wetter M.** Simulation-Based Building Energy Optimization [Livro]. - Berkeley : University of California, 2004.
- Wright J.A., Loosemore H.A. e Farmani R.** Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms [Artigo] // Energy and Buildings. - [s.l.] : Elsevier, 2002. - 9 : Vol. 34. - pp. 959-972.
- Yi H., Yi, Y. e Chan, T.** Performance based architectural design optimization: automated 3d space layout using simulated annealing [Conferência] // ASHRAE/IBPSA - Building Simulation Conference. - Atlanta, GA : [s.n.], 2014.
- Yi Y.K. e Kim H.** Agent-based geometry optimization with Genetic Algorithm (GA) for tall apartment's solar right [Artigo] // Solar Energy. - [s.l.] : Elsevier, 2015. - Vol. 113. - pp. 236-250.

Zhang Y e Korolija I JEPlus - Building Design Optimization [Online]. - <http://www.jeplus.org/wiki/doku.php>.

Zitzler E., Laumanns M e Thiele L. SPEA2: Improving the Strength Pareto [Periódico] // TIK-report / ed. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH) Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze (TIK). - 2001. - Vol. 103.

APÊNDICE

APÊNDICE A - COMPOSIÇÃO DE PREÇO UNITÁRIO DOS ELEMENTOS

PAREDES EXTERNAS					
Parede exterior leve					
Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada externa	F08 Superfície metálica				R\$0,00
Camada 2	I02 50mm Placa isolante	R\$15,28	R\$0,45	R\$0,00	R\$15,73
Camada 3	F04 Wall Camada de ar				R\$0,00
Camada 4	G01a 19mm Placa de gesso	R\$0,00	R\$0,00	R\$26,42	R\$26,42
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$42,15			

Parede exterior média					
Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada externa	M01 100mm Bloco de concreto	R\$9,09	R\$6,91	R\$0,00	R\$16,00
Camada 2	I02 50mm Placa isolante	R\$15,28	R\$0,45	R\$0,00	R\$15,73
Camada 3	F04 Wall Camada de ar				R\$0,00
Camada 4	G01a 19mm Placa de gesso	R\$0,00	R\$0,00	R\$26,42	R\$26,42
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$58,15			

Parede exterior pesada					
Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada externa	M01 100mm Bloco de concreto	R\$9,09	R\$6,91	R\$0,00	R\$16,00
Camada 2	M15 200mm Bloco de concreto pesado	R\$19,91	R\$4,86	R\$0,00	R\$24,77
Camada 3	I02 50mm Placa isolante	R\$15,28	R\$0,45	R\$0,00	R\$15,73
Camada 4	F04 Wall Camada de ar				R\$0,00
Camada 5	G01a 19mm Placa de gesso	R\$0,00	R\$0,00	R\$26,42	R\$26,42
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$82,92			

PAREDES INTERNAS					
Parede interior leve					
Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada externa	G01a 19mm Placa de gesso	R\$0,00	R\$0,00	R\$26,42	R\$26,42
Camada 2	F04 Wall Camada de ar				R\$0,00
Camada 3	G01a 19mm Placa de gesso	R\$0,00	R\$0,00	R\$26,42	R\$26,42
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$52,84			

Parede interior pesada					
Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada externa	G01a 19mm Placa de gesso	R\$0,00	R\$0,00	R\$26,42	R\$26,42
Camada 2	M05 200mm Bloco de concreto	R\$22,01	R\$0,44	R\$0,00	R\$22,45
Camada 3	G01a 19mm Placa de gesso	R\$0,00	R\$0,00	R\$26,42	R\$26,42
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$75,29			

COBERTURAS**Cobertura leve**

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada externa	M11 100mm Concreto leve	R\$41,07	R\$10,39	R\$0,00	R\$51,46
Camada 2	F05 Camada de ar do forro				R\$0,00
Camada 3	F16 Telha acústica	R\$96,86	R\$0,79	R\$0,00	R\$97,65
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$149,11			

Cobertura média

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada externa	M14a 100mm Concreto pesado	R\$49,77	R\$11,45	R\$0,01	R\$61,23
Camada 2	F05 Camada de ar do forro				R\$0,00
Camada 3	F16 Telha acústica	R\$96,86	R\$0,79	R\$0,00	R\$97,65
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$158,88			

Cobertura pesada

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada externa	M15 200mm Concreto pesado	R\$59,09	R\$6,91	R\$0,01	R\$66,01
Camada 2	F05 Camada de ar do forro				R\$0,00
Camada 3	F16 Telha acústica	R\$96,86	R\$0,79	R\$0,00	R\$97,65
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$163,66			

PISOS**Piso leve**

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada única	M11 100mm Concreto leve	R\$41,07	R\$10,39	R\$0,00	R\$51,46
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$51,46			

Piso médio

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada única	M14a 100mm Concreto pesado	R\$49,77	R\$11,45	R\$0,01	R\$61,23
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$61,23			

Piso pesado

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Camada única	M15 200mm Concreto pesado	R\$78,93	R\$6,41	R\$0,01	R\$85,35
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$85,35			

JANELAS**Janela leve**

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Janela	Instalação da esquadria	R\$166,90	R\$23,42	R\$0,00	R\$190,32
Vidro	Transparente 6mm	R\$141,95	R\$141,95	R\$0,00	R\$283,90
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$474,22			

Janela média

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Janela	Instalação da esquadria	R\$166,90	R\$23,42	R\$0,00	R\$190,32
Vidro	Verde 12mm	R\$159,72	R\$159,72	R\$0,00	R\$319,44
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$509,76			

Janela pesada

Camadas do elemento construtivo	Código e descrição dos materiais da ASHRAE no EnergyPlus	Material (R\$/m²)	Mão de obra (R\$/m²)	Outros (R\$/m²)	Total da camada (R\$/m²)
Janela	Instalação da esquadria	R\$166,90	R\$23,42	R\$0,00	R\$190,32
Vidro	Transparente 6mm	R\$159,72	R\$159,72	R\$0,00	R\$319,44
Ar	Camada de ar				
Vidro	Transparente 6mm	R\$159,72	R\$159,72	R\$0,00	R\$319,44
Preço do m² incluindo materiais, serviços e outros		R\$829,20			

ANEXOS

ANEXO A - PRODUTO DA FASE INICIAL DE PROJETO DE EDIFICAÇÕES

O autor Elvan Silva em seu livro “Uma introdução ao projeto arquitetônico” (Silva, 1991) elenca os seguintes aspectos que devem ser desenvolvidos na concepção de edificações. Seu resultado final é a junção destes aspectos:

- Definição volumétrica: Refere-se à morfologia geral da edificação projetado, ao modo pelo qual ele se insere no espaço, traduzindo-se no envoltório material do espaço arquitetônico. Deve-se adequar às premissas do contexto programático como também às características do entorno.
- Zoneamento das funções (ou atividades): Convencionou-se chamar de funcional ao instrumento que se preste de modo eficiente ao desempenho da própria finalidade. O anteprojeto deve ser organizado em zonas de utilização específica e o modo de arranjar estas zonas expressa maiores ou menores possibilidades de uso eficiente do espaço.
- Enquadramento no terreno: Consiste na influência dos aspectos planimétricos e altimétricos e da estrutura geológica do terreno na adoção do partido, na definição volumétrica e no zoneamento das funções.
- Tipologia construtivo-estrutural: Refere-se às características construtivas da solução estudada, o que, por sua vez, repercute no aspecto econômico da questão. Além disso, a própria concepção plástica do prédio relaciona-se ao sistema construtivo estrutural escolhido.
- Geometria dos espaços: Indica o formato e as dimensões de cada compartimento, o que é importante para sua adequabilidade instrumental, na proporção em que possibilitam o exercício de certas atividades, com ou sem o emprego de equipamento científico.
- Configuração das aberturas: Indica o formato, a posição, o tipo de funcionamento e o material de que são feitas as portas e janelas da edificação.
- Articulação das funções: Refere-se à maneira pela qual se interligam as diversas zonas funcionais, através do tipo de vínculos, áreas de conexão, posicionamento dos elementos de circulação vertical, etc., que interessam como fator de eficiência ou ineficiência no uso do espaço arquitetônico.
- Indicação do equipamento: Refere-se às dimensões, formatos, características e posição do equipamento fixo e móvel, que se relacionam com a satisfação de diversos requisitos programáticos. A representação do equipamento, nos desenhos do anteprojeto, fornece, além da noção de escala, informações importantes para a avaliação da adequabilidade instrumental da concepção proposta.
- Solução plástica: Consiste no conteúdo estético da arquitetura e encerra um valor que, frequentemente, prepondera sobre os demais na adoção ou rejeição de um estudo preliminar.
- Relacionamento com o entorno: Refere-se ao ambiente natural preservado ou alterado que circunda a edificação, o que pode contribuir decisivamente na definição da forma arquitetônica, modificando as condições de insolação, ventilação, iluminação natural, etc.

ANEXO B - SIMULAÇÃO COMO AUXÍLIO NAS FASES DE PROJETO

	Conceito	Estudo preliminar	Desenvolvimento	Documentos de Construção	Pós-ocupação
Objetivos da equipe	Usar a Modelagem de Desempenho de projeto nas fases iniciais para ajudar a definir os objetivos do projeto (NOTA: A modelagem de Desempenho de projeto pode ser com ferramentas de modelagem de componentes ou modelo básico de energia de edificação, mas deve, nessa etapa, endereçar outros parâmetros de desempenho além da energia) Definir os requisitos do projeto, conforme informado por resultados de modelagem	Análise financeira e informações de energia de desempenho do modelo para orientar decisões de projeto	Revisar alternativas de projeto com base em objetivos iniciais conforme informado por resultados de modelagem Criar linha de base e alternativas para escolher	Criar documentação necessária para acompanhar os resultados do modelo de energia para o cumprimento do código Criar documentação necessária para acompanhar os resultados do modelo de energia ou validação de comissionamento e medição/monitoramento	Utilizar os resultados do modelo construído para o comissionamento. Compare os resultados do modelo construído versus dados medidos para procurar os problemas
Objetivos de modelagem de energia	Experimentar com localização e orientação da edificação. Determinar construções de envoltória efetivas Avaliar os efeitos da iluminação natural e outras estratégias passivas Explore formas de reduzir cargas	Criar uma linha de base aproximada do modelo de energia Testar medidas de eficiência energética para determinar o menor uso possível de energia Configurar zonas térmicas e opções de HVAC	Criar modelos propostos com alternativas de sistema para escolher Refinar, adicionar detalhes e modificar os modelos, conforme necessário Fornecer gráficos anuais de uso de energia e outras métricas de desempenho para a linha de base versus proposta Avaliar produtos específicos para projeto Estratégias de controle de teste Verifique o controle de qualidade nos modelos	Completar o modelo de projeto final Verificar o controle de qualidade nos modelos Criar resultados finais de documentação necessária para enviar para conformidade com o código	Completar o modelo já construído com os valores de desempenho de corte cortados do componente instalado Coletar dados operacionais com medição para criar um modelo calibrado para compartilhar com o banco de dados baseado em resultados
Benefícios para o cliente	Obter todo o time de projeto unido em torno dos objetivos do projeto Usar os resultados da modelagem para tornar as decisões de projeto informadas pelo desempenho integrado do sistema	Testar diferentes opções antes de implementá-las Determine as soluções mais eficientes e econômicas	Determinar as soluções mais eficientes e econômicas Dimensionar o equipamento mecânico corretamente	Usar o modelo de energia como parte de LEED ou outro aplicativo de certificação de projeto sustentável Fornecer capacidade para prever melhor o uso de energia na edificação	Fornecer capacidade para refinar operações para atingir objetivos de uso de energia reduzida no projeto construído

Fonte: (Dingwall, 2012)

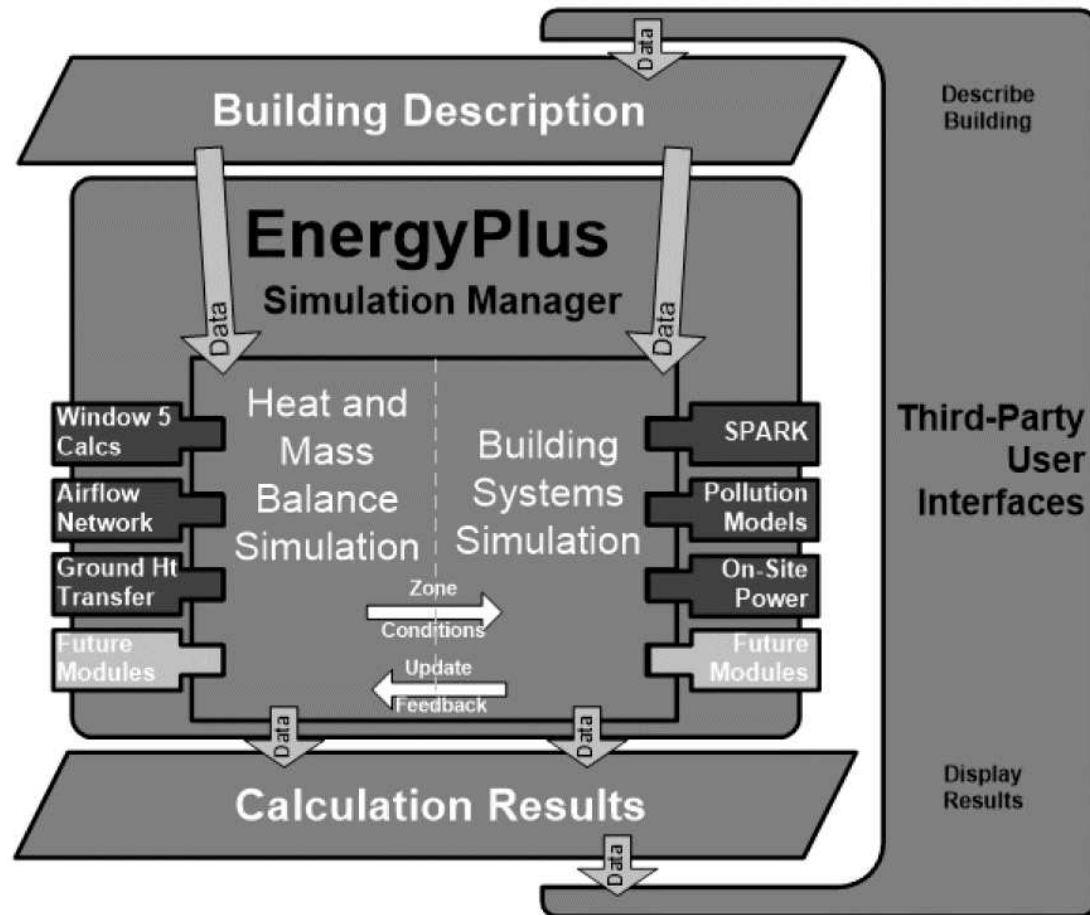
ANEXO C - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SIMULADOR ENERGYPLUS

Segundo a documentação do Software EnergyPlus (EnergyPlus, 2018), pode-se abstrair as seguintes informações pertinentes ao seu princípio de funcionamento e objetivos:

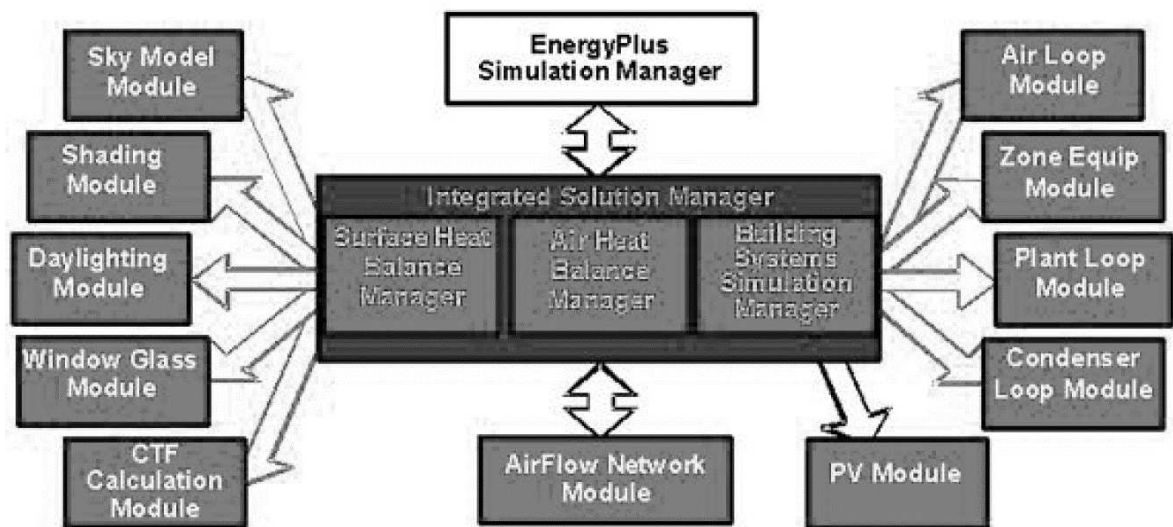
- O EnergyPlus TM é um programa de simulação de energia de toda a edificação que engenheiros, arquitetos e pesquisadores usam para modelar tanto o consumo de energia - para aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação e cargas de plug e processo - quanto o uso da água em edificações.
- O EnergyPlus calcula as cargas de aquecimento e resfriamento necessárias para manter os pontos de controle térmicos, condições em um sistema HVAC secundário e cargas de bobinas e o consumo de energia do equipamento da planta principal, bem como muitos outros detalhes de simulação que são necessários para verificar se a simulação está funcionando como a real.
- O EnergyPlus é um programa baseado em console que lê a entrada e grava a saída em arquivos de texto. Ele vem com uma série de utilitários, incluindo IDF-Editor para criar arquivos de entrada usando uma simples interface de planilha, EP-Launch para gerenciamento de arquivos de entrada e saída e execução de simulações em lote e EP-Compare para comparar graficamente os resultados de dois ou mais simulações.
- O EnergyPlus é gratuito, de código aberto e de plataforma cruzada - ele é executado nos sistemas operacionais Windows, Mac OS X e Linux. Seu desenvolvimento é financiado pelo Escritório de Tecnologias de Construção (BTO) do Departamento de Energia dos EUA (DOE).
- Várias interfaces gráficas abrangentes para o EnergyPlus também estão disponíveis. O DOE faz a maior parte de seu trabalho com o EnergyPlus usando o kit de desenvolvimento de software OpenStudio e o conjunto de aplicativos.
- Nenhum programa é capaz de lidar com todas as situações de simulação. No entanto, é a intenção do EnergyPlus para lidar com o máximo possível de opções de projeto de edificação e HVAC diretamente ou indiretamente por meio de links para outros programas, a fim de calcular as cargas térmicas e/ou consumo de energia em um projeto dia ou um longo período de tempo (até, inclusive, e além de um ano).
- Integração de Cargas, Sistemas e Plantas: Um dos pontos fortes do EnergyPlus é o integração de todos os aspectos da simulação - cargas, sistemas e plantas. Baseado em uma versão de pesquisa do programa BLAST chamado IBLAST, a saída do sistema e da planta pode impactar diretamente a resposta térmica da edificação ao invés de calcular todas as cargas primeiro, depois simular sistemas e plantas.
- A simulação é acoplada permitindo que o projetista investigue com mais precisão o efeito de diminuir o tamanho de ventiladores e equipamentos e que impacto isso pode ter no conforto térmico de módulos simples e explícitos. Normalmente, cada módulo é acessível apenas através de uma chamada ao seu gerente rotina.

O diagrama abaixo apresenta uma visão geral do funcionamento dos EnergyPlus

EnergyPlus - Estrutura geral



EnergyPlus - Elementos internos



Fonte: (EnergyPlus, 2018)

ANEXO D - PESQUISAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS A EDIFICAÇÕES

Ref	Autor	Data	MO	Tópico	Intervenção	Método de otimização	Objetivo	Variáveis	Sistema Simulado	Método de Simulação	Software de simulação
[114]	Abdollahi & Meratizaman	2011	Pareto	Ren	N/A	GA (caixa de ferramentas MOEA)	Eficiência energética, taxas de custo	Capacidade da planta	Sistema CHP	Custo estível	
[36]	Al Homoud	1997	Mono objetivo	Env	Comm	DS (Simplex; Não linear)	Energia	Construções Envidraçamento	Envoltória	Por hora (1 dia / semana)	EnerCalc
[38]	Al Homoud	2009	Mono objetivo	Env	N/A	DS (Nelder-Mead)	Energia	Construções Vidros	Envoltória	Por hora (1 dia / semana)	EnerCalc
[56]	Asadi et al	2012	Pareto	Env, Ren	Retrofit	DS (Fletcher-Mead)	Energia, custo de construção	Construções Vidros, Renováveis	Envoltória, Solar térmico	Por hora (1 dia / semana)	
[138]	Pacheco & Krati	2011	Mono objetivo	Env, Sys, Cont	Rest	GA (PSO, favela bruta)	Custo do ciclo de vida	Forma, Construção, Sistemas, Set points	Edificação inteiro	7	DOE-2
[35]	Pacheco & Lethman	1980	Mono objetivo	Env	Comm	DS (Simplex; Não + random complex)	Conforto	Construções, Vidros, Shape	Envoltória	Método de admissão	
[82]	Caldas & Nefed	2008	Pareto	Form	Comm	GA	Custo de construção, energia, energia incorporada	Layut, Forma, Construções	Edificação inteiro	Para de luz de dia, 7	DOE-2, IE
[100]	Chen & Nefed	2002	Mono objetivo	Form	Comm	GA	Energia	Dimensões da janela	Envoltória	Para de luz de dia, 7	DOE-2, IE
[101]	Chen & Nefed	2002	Pareto	Env	Comm	GA	Energia	Forma e posição de luz	Envoltória	Para de luz de dia, 7	DOE-2, IE
[189]	Chen & Nefed	2002	Pareto	Env	Retrofit	GA (Simplex; Não linear)	Energia	Construções, Sistemas, Set points	Envoltória	Para de luz de dia, 7	DOE-2, IE
[103]	Chen & Nefed	2002	Pareto	Env	Retrofit	GA (Simplex; Não linear)	Energia	Construções, Sistemas, Set points	Envoltória	Para de luz de dia, 7	DOE-2, IE
[104]	Chen & Nefed	2002	Pareto	Env	Retrofit	GA (Simplex; Não linear)	Energia	Construções, Sistemas, Set points	Envoltória	Para de luz de dia, 7	DOE-2, IE
[40]	Colley & Schuler	2012	Mono objetivo	Env	Comm	GA	Energia	Fluxo e temperatura de fornecimento e retorno	sistema HVAC	Método de admissão	TRN-SYS, COMIS
[102]	Conradie & Kullie	2012	Mono objetivo	Sys	Comm	GA	Energia	Calor, temperaturas da água	sistema HVAC	Método de admissão	EXCAUIBUR
[52]	Dakaki et al	2008	Pareto	Env	N/A	DS (construções, objetivo)	Energia	Calor, temperaturas da água	sistema HVAC	Método de admissão	EnergPlus
[113]	Evans et al	2011	Pareto	Ren	N/A	GA (NSGA-II)	Custo de construção, custo operacional, energia	Capacidade da planta, datas de construção	Sistema CHP	Custo anual	
[87]	Evans et al	2011	Pareto	Env	N/A	GA (NSGA-II)	Energia (aquecimento, refrigeração)	Alberitua, Taxa de fluxo, pontos de ajuste	Envoltória	0,0, 0,0 (0,31 semanas)	BCVTB, EnergyPlus
[140]	Evans et al	2012	Pareto	Env, Form, Sys, Ren	Rest	GA (NSGA-II)	Custo total, energia	Forma, Construções, Sistemas, Renováveis	Edificação inteiro	Método de conformidade	SAP
[135]	Evans et al	2012	Pareto	Env, Form, Sys, Ren	N/A	GA (NSGA-II) (com pesquisa local)	Custo de construção + Energia	Forma, Construções, Sistemas, Renováveis	Zona típica	Forma anual	EnergPlus
[56]	Fesanghary et al	2012	Pareto	Env	Rest	Pesquisa de Harmonia	Custo do ciclo de vida, CO ₂	Construções	Edificação inteiro	Forma anual	EnergPlus
[100]	Fong et al	2006	Mono objetivo	Sys	N/A	Programação Evolutiva	Energia	Temp refrigerado da fonte de água, ter da fonte de ar ..	sistema HVAC	Por mês	TRN-SYS
[81]	Gaoge & Andersen	2011	Pareto	ON	N/A	GA (micro-GA)	Luz do dia, brilho	Construções, sombreamento	Envoltória	Tratado de raios	LightSolve Viewer
[126]	Ghahs & Jabbar	2012	Soma ponder.	Ren	N/A	Projeto de experimentos	Custo de construção, custo operacional	Construções, sombreamento	Edificação inteiro	Por mês	TRN-SYS
[142]	Hamdy et al	2011	Pareto	Env, Form, Sys, Ren	Rest	GA (variante NSGA-II)	CO ₂ , custo de construção	Construções Vidros, Sistemas	Edificação inteiro	Forma anual	IDA ICE
[143]	Hamdy et al	2012	Pareto	Env, Form, Sys, Ren	Rest	GA (variante NSGA-II)	Energia, custo do ciclo de vida	Construções Vidros, Sistemas, Renováveis	Edificação inteiro	Forma anual	IDA ICE, IDA E310
[49]	Hassan et al	2008	Mono objetivo	Env	Rest	PSO-ell	Custo do ciclo de vida	Construções	Envoltória	Forma anual	IDA ICE
[44]	Holst	2003	Soma ponder.	Env	N/A	DS (HD)	Energia, Conforto	Construções, Vidros	Envoltória	Forma anual	EnergPlus
[57]	Huang et al	2012	Pareto	Env	Rest	GA (simplex)	Unidade, custo de construção	Humidity buffer material location a, espessura	Nível de umidade	Raios de contribuição	
[149]	Jin & Overend	2002	Pareto	Env, Sys	Retrofit	GA (NSGA-II)	CO ₂ , custo total, Conforto	Estratégias De Renovação, Construções	Edificação inteiro	Forma anual	EnergPlus
[48]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[101]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[102]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[103]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[104]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[105]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[106]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[107]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[108]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[109]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[110]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[111]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[112]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[113]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[114]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[115]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[116]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[117]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[118]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[119]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[120]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[121]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[122]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[123]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[124]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[125]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[126]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[127]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[128]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[129]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[130]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[131]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[132]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[133]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[134]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[135]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[136]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[137]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[138]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[139]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[140]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[141]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[142]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[143]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[144]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[145]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[146]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[147]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[148]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[149]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[150]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[151]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[152]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[153]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[154]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[155]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[156]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[157]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[158]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[159]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[160]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[161]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[162]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[163]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[164]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[165]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[166]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[167]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[168]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[169]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[170]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[171]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[172]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[173]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[174]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[175]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[176]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[177]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[178]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[179]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[180]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[181]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[182]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[183]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[184]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[185]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[186]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo	Env	Rest	GA (NSGA-II)	Energia	Construções	Envoltória	Tratado de raios	EnergPlus
[187]	Kump & Robinson	2009	Mono objetivo								

ANEXO F - SOFTWARES DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS A EDIFICAÇÕES

Nome	Código aberto?	Algoritmo multiobjetivo?	Computação paralela?	Manipulação discreta + variáveis contínuas?	Estudo paramétrico?	Análise sensitiva?	Genérico para programas BPS?	Múltiplos algoritmos?	Interface de usuário?	Flexibilidade da função custo?	Flexibilidade de parâmetros?	Extensibilidade algorítmica?	Modelo substituto?	Sistema operacional?
Altair HyperStudy	-	+	?	-	+	+	+	+	+	+	+	?	+	Windows pond
BEopt	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+/-	+	-	Windows pond
BOSS quattro	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	?	+	+	Unix, Linux, Windows pond
DAKOTA	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	?	+	Windows pond, Linux
GENE_ARCH	+	+	-	-	-	-	-	+	?	+	+	-	-	?
GenOpt	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-	Independente
GoSUM	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	?	+	Windows pond
ISight	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	Windows pond, Linux
JEPlus + EA	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	Independente
LionSolver	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	+	Windows pond
Caixa de ferramentas MatLab	-	+	+	+	+	+	+	+	+/-	+	+	+	+	Windows pond, Mac, Linux
MOBO	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	Independente
ModeFRONTIER	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	?	+	Windows pond, Linux
ModelCenter	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	Windows pond
MultiOpt 2	-	+	?	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	Windows pond
Opt-E-Plus	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	Windows pond
ParadisEO	+	+	?	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-	Windows pond, Mac, Linux
TRNOPT	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	Windows pond

Fonte: (Nguyen, et al., 2014)