



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**METODOLOGIA PARA ATINGIR BALANÇO
ENERGÉTICO QUASE-NULO EM EDIFÍCIOS
COMERCIAIS CLIMATIZADOS
ARTIFICIALMENTE**

Por,
Rafael Gomez Miziara

Brasília, 20 de Novembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**METODOLOGIA PARA ATINGIR BALANÇO
ENERGÉTICO QUASE-NULO EM EDIFÍCIOS
COMERCIAIS CLIMATIZADOS
ARTIFICIALMENTE**

POR,

Rafael Gomez Miziara

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Armando de Azevedo Caldeira Pires, UnB/
ENM

Prof. Marco Antônio Freitas do Egito Coelho, UnB/
ENE

Prof. Cláudia Naves David Amorim, UnB/FAU

Brasília, 20 de Novembro de 2018

RESUMO

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para transformar edifícios comerciais, altos, com grande número de pavimentos e climatizados artificialmente em nZEB, ou Edifícios com Balanço Energético Nulo.

Primeiramente foi apresentada uma introdução da importância de edifícios com alta eficiência energética. Em seguida, apresentou-se uma definição de nZEB para orientar o desenvolvimento da metodologia proposta.

A metodologia foi desenvolvida, onde foram definidos diferentes níveis de aumento de eficiência energética a serem atingidos, bem como critérios básicos para que o balanço energético nulo seja atingido. Em seguida, as quatro etapas principais da metodologia são desenvolvidas. A primeira é a análise da situação atual do edifício. A segunda etapa é a de análise e seleção de estratégias de melhoria de eficiência energética para o edifício. A terceira etapa é a implementação de um sistema de geração de energia renovável, complementando o novo consumo de energia do edifício. E para finalizar a metodologia, uma análise de viabilidade econômica é realizada.

Em seguida, apresentou-se o estudo de caso, o edifício Brasília Trade Center, localizado em Brasília - DF e uma caracterização do edifício foi realizada, através de visitas técnicas e informações obtidas da administração do edifício.

Finalmente, a metodologia foi aplicada ao estudo de caso, seguindo o passo-a-passo de todos os tópicos desenvolvidos na metodologia, com os resultados obtidos apresentados ao final.

ABSTRACT

The main objective of the present work is to develop a methodology to convert a commercial building with the following characteristics: tall, large number of stories, artificially air-conditioned into a nZEB, or nearly Zero Energy Building. First, an introduction of the importance of buildings with high energy efficiency was presented. Next, a definition of nZEB was presented in order to guide the development of the proposed methodology.

The methodology was developed, where different levels of attainable energy efficiency were defined, as well as basic criteria so that the zero energy balance is reached. Then the four main steps of the methodology are developed. The first is the analysis of the current situation of the building. The second stage is the analysis and selection of energy efficiency improvement strategies for the building. The third step is the implementation of a renewable energy generation system, complementing the new energy consumption of the building. And to finalize the methodology, an economic feasibility analysis is performed.

The Brasília Trade Center building, located in Brasília, Brazil, was chosen as the case study and a characterization of the building was carried out, through technical visits and information obtained from the administration of the building.

Finally, the methodology was applied to the case study, following the step-by-step of all the topics developed in the methodology, with the results obtained presented at the end.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	O TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA.....	9
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
1.3	OBJETIVOS.....	17
1.4	METODOLOGIA.....	18
1.5	ESTRUTURA DO RELATÓRIO.....	19
2.	CONCEITO NZEB.....	21
2.1	DEFINIÇÃO DE NZEB.....	21
2.2	CAMINHO PARA ALCANÇAR O NZEB.....	23
2.3	nZEB – “Nearly Zero Energy Building”.....	24
2.4	NORMAS E CERTIFICAÇÕES.....	25
2.5	PROJETOS nZEB.....	26
3.	TEORIA DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	34
3.1	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	34
3.2	TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE (TMA).....	34
3.3	VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL).....	35
3.4	PAYBACK.....	35
3.5	TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR).....	37
3.6	ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE (IL) E TAXA DE RENTABILIDADE (TR).....	38
3.7	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE PROJETOS.....	38
4.	ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS PARA ALCANÇAR nZEB.....	39
4.1	SOLUÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	39
4.2	ALTERNATIVAS DE ENVOLTÓRIA.....	41
4.2.1	ABSORTÂNCIA.....	42
4.2.2	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA.....	42
4.3	ALTERNATIVAS DE ILUMINAÇÃO.....	45
4.3.1	COMPONENTES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO.....	46
4.4	ALTERNATIVAS DE CLIMATIZAÇÃO.....	49
4.4.1	ALTERNATIVAS DE RETROFIT.....	49
4.4.2	TECNOLOGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA NOVOS SISTEMAS DE AVAC.....	52
4.5	ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	62
5.	METODOLOGIA PARA ATINGIR nZEB.....	65
5.1	VISÃO GERAL DO MÉTODO.....	65
5.2	NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA A SER ATINGIDO.....	70
5.3	CRITÉRIOS BÁSICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA.....	71
5.4	1ª ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO.....	73
5.4.1	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA ATUAL.....	73
5.4.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO EDIFÍCIO.....	73
5.4.3	CARACTERÍSTICAS DE ENVOLTÓRIA.....	73
5.4.4	CARACTERÍSTICAS DE ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.....	74
5.4.5	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO.....	74
5.4.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO.....	76
5.4.7	SIMULAÇÃO – PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO.....	76
5.4.8	SIMULAÇÃO – CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA.....	76
5.5	2ª ETAPA: PROPOSTAS DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	76
5.5.1	OTIMIZAÇÃO.....	77
5.5.2	PROPOSTAS DE CLIMATIZAÇÃO.....	82
5.5.3	PROPOSTAS DE ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.....	83
5.5.4	PROPOSTAS DE ENVOLTÓRIA.....	83
5.5.5	PROPOSTAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.....	83
5.5.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS.....	84
5.6	3ª ETAPA: IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL.....	84
5.6.1	TIPO DE LIGAÇÃO DO EDIFÍCIO COM A REDE DE CONCESSIONÁRIA.....	84

5.6.2	DISPONIBILIDADE PARA GERAÇÃO ON-SITE.....	84
5.6.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO	85
5.7	4ª ETAPA: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	86
5.7.1	CUSTOS INICIAIS DE IMPLEMENTAÇÃO.....	86
5.7.2	CUSTOS OPERACIONAIS	86
5.7.3	DEFINIÇÃO DA TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE	86
5.7.4	PAYBACK.....	86
5.7.5	TAXA DE RENTABILIDADE E ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE	86
5.7.6	RESULTADOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	87
6.	ESTUDO DE CASO	88
6.1	O EDIFÍCIO BRASÍLIA TRADE CENTER.....	88
6.2	SISTEMA DE AR CONDICIONADO CENTRAL.....	89
6.3	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	90
6.4	ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA	91
6.4.1	FECHAMENTOS OPACOS.....	91
6.4.2	FECHAMENTOS TRANSLÚCIDOS E TRANSPARENTES	95
6.5	ANÁLISE DE ILUMINAÇÃO	97
6.6	ANÁLISE DE SISTEMA DE AR-CONDICIONADO	97
7.	METODOLOGIA APLICADA AO ESTUDO DE CASO	101
7.1	NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICO A SER ATINGIDO.....	101
7.2	CRITÉRIOS BÁSICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA	101
7.3	1ª ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO	102
7.3.1	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	102
7.3.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO EDIFÍCIO	102
7.3.3	CARACTERÍSTICAS DA ENVOLTÓRIA.....	103
7.3.4	CARACTERÍSTICAS DA ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.....	103
7.3.5	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO.....	103
7.3.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO	104
7.3.7	SIMULAÇÃO – PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO	105
7.3.8	SIMULAÇÃO – CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA.....	107
7.4	2ª ETAPA: PROPOSTAS DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	111
7.4.1	OTIMIZAÇÃO	111
7.4.2	PROPOSTAS DE CLIMATIZAÇÃO	112
7.4.3	PROPOSTAS DE ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	113
7.4.4	PROPOSTAS DE ENVOLTÓRIA.....	113
7.4.5	PROPOSTAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.....	114
7.4.6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS	115
7.4.7	SIMULAÇÃO – PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO.....	115
7.4.8	SIMULAÇÃO – CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA.....	116
7.5	3ª ETAPA: IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL.....	118
7.5.1	TIPO DE LIGAÇÃO DO EDIFÍCIO COM A REDE DE CONCESSIONÁRIA	118
7.5.2	DISPONIBILIDADE PARA GERAÇÃO ON-SITE.....	118
7.5.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO	119
7.6	4ª ETAPA: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	122
7.6.1	CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO INICIAIS.....	122
7.6.2	CUSTOS OPERACIONAIS	122
7.6.3	DEFINIÇÃO DA TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE	123
7.6.4	PAYBACK.....	123
7.6.4	TAXA DE RENTABILIDADE E ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE	126
7.6.5	RESULTADOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	127
8.	CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS.....	128
8.1	CONCLUSÕES	128
8.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	130
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Consumo de Energia por País no ano de 2016 (ENERDATA, 2017).....	10
Figura 1.2 - Fontes de energia em 2016 (adaptado de ENERDATA, 2017).	10
Figura 1.3 - Participação das Fontes de Geração (BRASIL, 2016).....	11
Figura 1.4 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte (BRASIL, 2016).	12
Figura 1.5 - Consumo Final de Energia por Fonte (BRASIL, 2016).	12
Figura 1.6 - Perfil de consumo em prédios públicos (PROCEL, 2009).....	15
Figura 2.1 - Gráfico representando o conceito do equilíbrio NZEB (Sartori, 2012).	24
Figura 2.2 - ENCE geral de projeto e ENCE geral da Edificação Construída (BRASIL, 2017).	25
Figura 2.3 - Níveis de Certificação LEED (EUA, 2017).	26
Figura 2.4 - Edifício Green Office Meudon (Green Office® Meudon, 2011).....	27
Figura 2.5 - Turbina Eólica do edifício Pearl River Tower (Owings & Merrill LLP, 2012). ..	28
Figura 2.6 - Edifício Pearl River Tower (Owings & Merrill LLP, 2012).	29
Figura 2.7 - Brock Environmental Center (Chesapeake Bay Foundation, 2014).....	30
Figura 2.8 - BedZED (Zed Factory, 2002).....	31
Figura 2.9 - Fábrica da Medice (Medice, 2010).....	31
Figura 2.10 - Centro de Estudos de Clima e Ambientes Sustentáveis (USP, 2008).	32
Figura 3.1 - Evolução do VPL Acumulado do Projeto a Cada Período (adaptado de Quiza, 2011).	36
Figura 4.1 - Estratégias para alcançar nZEB (Adaptado de Sartori, 2012)	39
Figura 4.2 - Estratégias para aumentar a eficiência energética	40
Figura 4.3 - Etapas para se atingir o nZEB	41
Figura 4.4 - Tecnologias em Eficiência Energética para AVAC	52
Figura 4.5 - Fonte de Produção de Energia para um nZEB.....	62
Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia	66
Figura 5.2 - Limites de temperatura operativa e umidade relativa do ar (ASHRAE)	79
Figura 6.1 - Edifício Brasília Trade Center (Brasília Trade Center, 2017).	88
Figura 6.2 - Perfil de Consumo Energético do BTC	90
Figura 6.3 - Representação de parade simples utilizada no edifício BTC (INMETRO, 2013).	92
Figura 6.4 - Vista 3D do Brasília Trade Center e Anexo (Internet).....	92
Figura 6.5 - Cobertura do BTC e Anexo (Internet)	92
Figura 6.6 - Laje pré-moldada (INMETRO, 2013).	93
Figura 6.7 - Foto da cobertura de laje pré-moldada do edifício (O AUTOR, 2018).....	93
Figura 6.8 - Cobertura metálica sobre laje pré-moldada (INMETRO, 2013).....	94
Figura 6.9 - Foto da cobertura metálica do edifício (O AUTOR, 2018).	94
Figura 6.10 - Propriedades Térmicas do vidro utilizado no edifício (Adaptado de INMETRO, 2013)	95
Figura 6.11 - Modelo de vidros e esquadrias adotados pelo edifício (O AUTOR, 2018)....	96
Figura 6.12 - Entradas principais do edifício (O AUTOR, 2018).	96
Figura 6.13 - Luminária utilizada em corredores, escadas e subsolo no BTC (O AUTOR, 2018).	97
Figura 6.14 - Chiller de condensação a água (O AUTOR, 2018).....	98
Figura 6.15 - Vista em detalhe do sistema casco e tubo do chiller (O AUTOR, 2018).	98
Figura 6.16 - Bombas de água gelada e água de condensação (O AUTOR, 2018).	99
Figura 6.17 - Distribuição de água gelada por prumada (O AUTOR, 2018).	100
Figura 6.18 - Fancoil original utilizado no edifício (O AUTOR, 2018).	100
Figura 7.1 - Área de trabalho do software SketchUp	104

Figura 7.2 - Modelo do edifício Brasília Trade Center	105
Figura 7.3 - Consumo energético ao longo do ano	107
Figura 7.4 - Temperatura de bulbo seco para um ano em Brasília (CINTRA, 2018).....	108
Figura 7.5 - Umidade relativa do ar para um ano em Brasília (CINTRA, 2018)	108
Figura 7.6 - Perfil de ocupação do edifício para um dia de trabalho	109
Figura 7.7 - Perfil de carga térmica ao longo de um ano	110
Figura 7.8 - Perfil de carga térmica semanal	110
Figura 7.9 - Perfil de consumo energético para novas soluções de eficiência energética	116
Figura 7.10 - Novo perfil de carga térmica anual	117
Figura 7.11 - Novo perfil de carga térmica semanal	118
Figura 7.12 - Área de trabalho do software PVSyst	119
Figura 7.13 - Orientação dos módulos FV	120
Figura 7.14 - Definições do sistema de módulos FV.....	120
Figura 7.15 - Fluxo de caixa descontado para o edifício BTC.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo das soluções empregadas nos edifícios nZEB	33
Tabela 3.1 - Fluxo de caixa de um projeto (adaptado de Quiza, 2011).	36
Tabela 4.1 - Absortância em Função da Cor do Material Construtivo (Lamberts, 2004) ..	42
Tabela 4.2 - Índice de absortância de alguns materiais (ABNT, 2003)	42
Tabela 4.3 - Índices de transmitância térmica de alguns materiais (ABNT, 2003).....	43
Tabela 4.4 - Alternativas de Envolvória	44
Tabela 4.5 - Iluminâncias por classe de tarefas visuais (ABNT, 1992).....	46
Tabela 4.6 - Características gerais dos diversos tipos de lâmpadas. (ARAUJO, 2017)	47
Tabela 4.7 - Tipos de luminárias (SANTOS et al., 2006)	48
Tabela 4.8 - Tipos de reatores.....	49
Tabela 4.9 - Alternativas de retrofit convencional aplicáveis a AVAC (Adaptado de DOE, 2011).	50
Tabela 4.10 - Medidas de retrofit completo aplicáveis a AVAC (adaptado de DOE, 2011)	51
Tabela 4.11 - Alternativas de geração de energia elétrica on-site.....	63
Tabela 4.12 - Alternativas de geração de energia elétrica off-site	64
Tabela 5.1 - Valores de vazão para edifícios de escritórios (ABNT, 2008)	80
Tabela 7.1 - Características gerais do edifício	102
Tabela 7.2 - Características da envoltória	103
Tabela 7.3 - Características de iluminação	103
Tabela 7.4 - Características do sistema de ar condicionado	104
Tabela 7.5 - Consumo energético anual.....	106
Tabela 7.6 - Contribuição dos sistemas de iluminação, equipamentos e climatização... ..	106
Tabela 7.7 - Características do novo sistema de climatização	113
Tabela 7.8 - Características do novo sistema de iluminação e equipamentos	113
Tabela 7.9 - Características da nova envoltória proposta	114
Tabela 7.10 - Valores de implementação do sistema de automação e controle	114
Tabela 7.11 - Comparativo entre consumos de energia elétrica	115
Tabela 7.12 - Contribuição do sistema de climatização, iluminação e equipamentos no novo consumo.....	115
Tabela 7.13 - Comparativo entre os maiores consumidores de energia elétrica.....	115
Tabela 7.14 - Comparativo entre carga térmica atual e nova.....	117
Tabela 7.15 - Resultados da simulação do sistema fotovoltaico	121
Tabela 7.16 - Impacto da geração fotovoltaica no consumo de energia pós-intervenção	121
Tabela 7.17 - Comparação dos consumos energéticos pré e pós-intervenções	121
Tabela 7.18 - Comparativo dos índices de consumo energético.....	122
Tabela 7.19 - Custos iniciais de implementação	122
Tabela 7.20 - Custos Operacionais.....	123
Tabela 7.21 - Despesas e Receitas para o Edifício BTC	124
Tabela 7.22 - Fluxo de caixa para o edifício BTC.....	125
Tabela 7.23 - Valores Presentes líquido, das saídas e das entradas do fluxo de caixa ..	126
Tabela 7.24 - Resultados de viabilidade econômica	127

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o tema em estudo e sua relevância, assim como um breve resumo histórico do conceito nZEB desde sua definição até o estado da arte usados nos projetos contemporâneos, finalizado com os objetivos do projeto e como alcança-los...

1.1 O TEMA EM ESTUDO E SUA RELEVÂNCIA

Com a população brasileira atingindo cerca de duzentos e cinquenta milhões de pessoas e a população mundial beirando as dez bilhões de pessoas até 2050 de acordo com as projeções probabilísticas da ONU (UNITED NATIONS, 2018), a demanda e consumo dos recursos naturais renováveis são cada vez maiores e a disponibilidade desses recursos não consegue acompanhar o crescimento do consumo.

Em 1972 foi realizada a *Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano*, primeira conferência das Nações Unidas, ocorrida entre os dias 5 a 16 de junho, que contou com representantes de 113 países, 250 ONGs e membros da ONU. Como resultados da conferência foram elaboradas a Declaração do Meio Ambiente Humano e um plano de ação para buscar soluções para os problemas ambientais (UNITED NATIONS, 1972). A conferência de 1972 marcou o início de discussões sobre a degradação do meio ambiente e mudanças climáticas. A partir de então diversas conferências foram organizadas para tentar atingir um desenvolvimento industrial sustentável, com exploração consciente dos recursos naturais disponíveis.

O consumo mundial de energia em 2016 foi de aproximadamente 13.400 MTPE (Milhões de Toneladas de Petróleo Equivalente), sendo os maiores consumidores mundiais Estados Unidos, China e Índia. (ENERDATA, 2017).

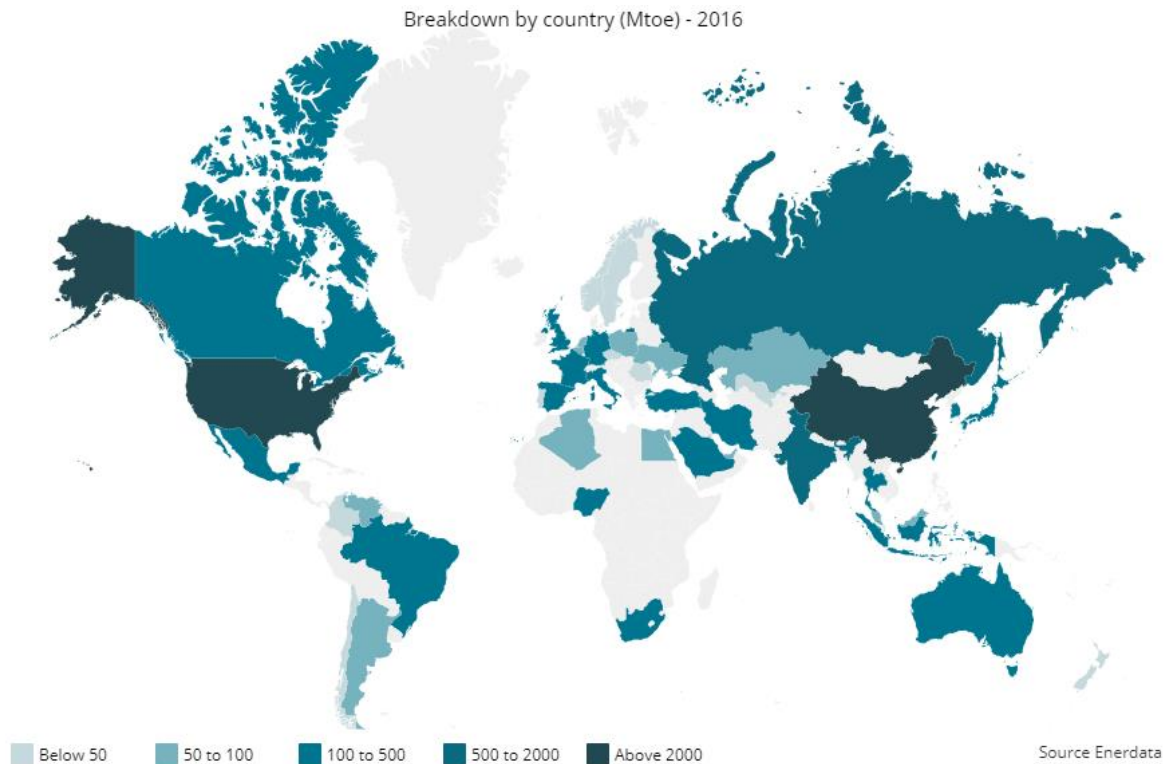


Figura 1.1 - Consumo de Energia por País no ano de 2016 (ENERDATA, 2017).

De toda essa energia consumida, os combustíveis fósseis são responsáveis por 32%, carvão é responsável por 27%, gás por 21%, biomassa 11% e eletricidade 9%.

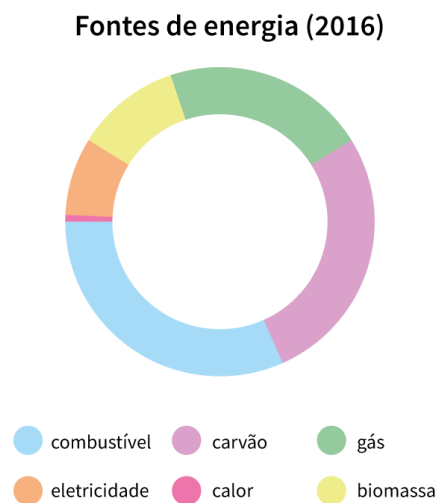


Figura 1.2 - Fontes de energia em 2016 (adaptado de ENERDATA, 2017).

De acordo com a Agência Internacional de Energia, países emergentes e subdesenvolvidos serão os responsáveis pelos maiores crescimentos de demanda energética até 2030, devido a diminuição dos índices de pobreza mundiais, um maior número de pessoas está entrando no mercado consumidor, aumentando a demanda por energia. Já em países desenvolvidos, a tendência é de haver redução no uso

de combustíveis fósseis, carvão e gás, sendo substituídos por fontes renováveis como energia solar, energia eólica, biomassa, entre outras fontes de energia.

O Brasil, nos anos de 2001 e 2002, enfrentou uma das mais sérias crises energéticas de sua história, mais de 90% da energia elétrica era produzida nas hidrelétricas. Isso ocasionou uma sobrecarga na matriz energética brasileira, que não conseguia suprir a demanda de consumo do país, com isso o risco de falta de energia era certo. Isso obrigou a população a se reeducar e mudar seus hábitos de consumo de energia.

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2017, divulgado pelo Ministério de Minas e Energia, em 2016 a produção de energia elétrica atingiu 288,3 Mtep. O Brasil possui uma matriz energética de origem predominantemente renovável. As fontes renováveis de geração de energia representam 81,7% da oferta interna, onde a geração hidráulica é responsável por 68,1%, sendo a principal fonte de geração de energia do país, com um total de 36 Mtep. O restante é proveniente de fontes eólicas, solar e biomassa.

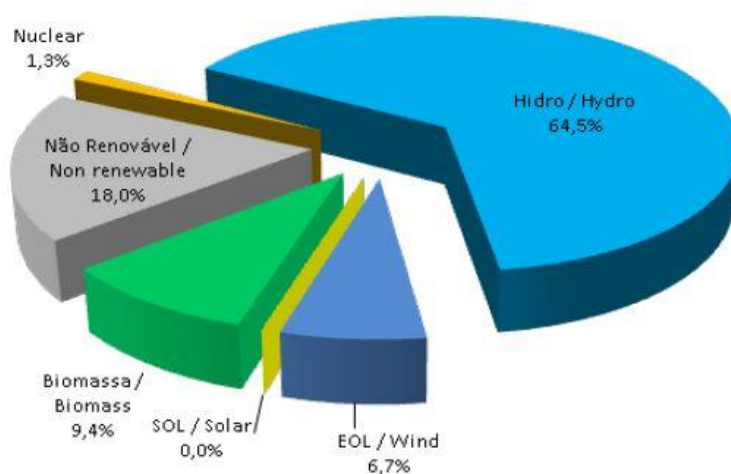
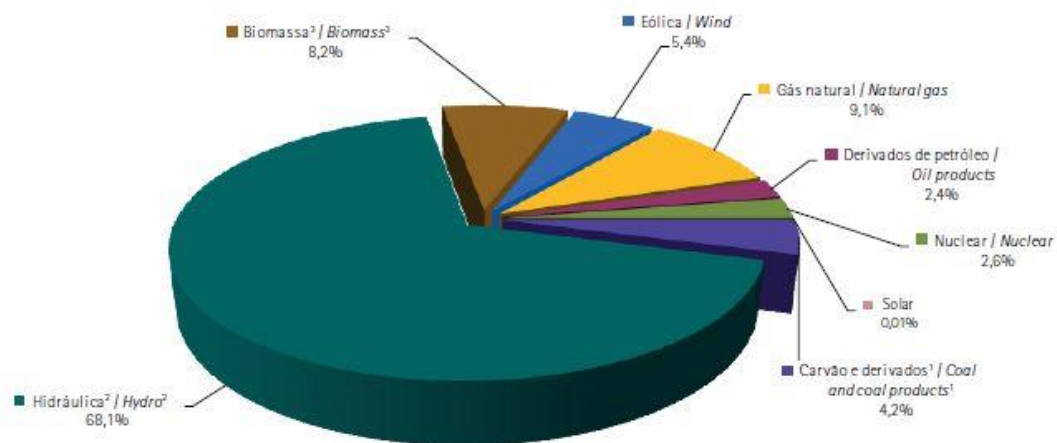


Figura 1.3 - Participação das Fontes de Geração (BRASIL, 2016).

A produção de eletricidade a partir de fonte eólica alcançou 33,489 GWh em 2016, um aumento de 55% em relação ao ano anterior. Com uma potência instalada de 10.124MW, uma expansão de 33% comparada ao ano anterior.

A geração de energia elétrica a partir de fontes não renováveis representou 19,6% do total nacional, contra 25,9% no ano anterior, uma redução de 6,3%. A geração de autoprodutores foi de 17% do total produzido, atingindo um montante de 98,5 TWh. Desse total, 55,5 TWh foi produzido e consumido pela própria instalação geradora. As importações líquidas chegaram a 40,8 TWh.



Notas / Notes:

1. Inclui gás de coqueria / Includes coke oven gas
2. Inclui importação de eletricidade / Includes electricity imports
3. Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações / Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Figura 1.4 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte (BRASIL, 2016).

Do lado do consumo, 255,4 Mtep foram consumidas em 2016, uma redução de 2,2% comparado ao ano anterior. Desse valor, as indústrias consomem 33%, os transportes 32,4%, residências 9,7%, setor energético 10,3% agropecuária 4% e serviços 4,9%. Observa-se que a produção industrial, transporte de cargas e mobilidade de pessoas são responsáveis por quase 65% do consumo de energia do país.

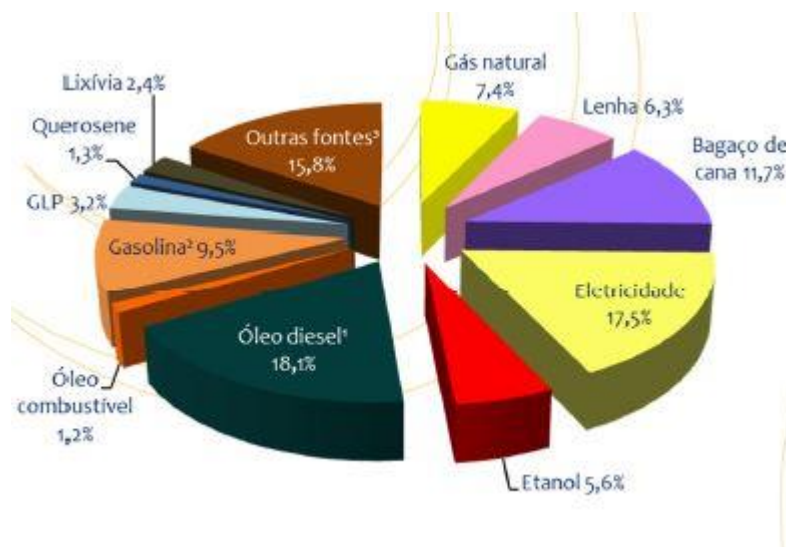


Figura 1.5 - Consumo Final de Energia por Fonte (BRASIL, 2016).

Com as preocupações com o meio ambiente e novos hábitos de consumo de energia, os estudos relacionados à eficiência energética em edifícios vêm possibilitando a construção de edificações que possuam um baixo consumo de energia elétrica, ainda, possibilitando, a concepção de edifícios que possuem saldo energético igual ou próximo a zero, conhecidos como NZEB.

A construção de edificações nZEB já se tornou uma realidade, e não apenas uma tendência, já que os edifícios são responsáveis por uma boa parcela de toda a energia consumida no mundo, a redução dessa parcela e conseqüentemente a redução do impacto ambiental associado a ela passa a se tornar uma prioridade em projetos de novas edificações e mais importante, em edifícios que já existem e que devem ser modernizados para que diminuam o consumo de energia.

Um nZEB, é uma construção, com uma demanda de energia bastante reduzida, onde os ganhos de eficiência energética se dão pela aplicação de tecnologias de renovação de energia. O desenvolvimento de edificações nZEB é possível através de envoltórias de alta eficiência, que tornam o prédio quase isotérmico e imune aos elementos externos, da utilização de equipamentos de alta eficiência e baixo consumo energético e também da utilização em massa de métodos de recuperação de energia e energias renováveis. Todos esses métodos em conjunto devem ser suficientes para suprir a demanda de energia da edificação, para ser considerado um nZEB.

Em 11 de Dezembro de 1997 o protocolo de Quioto foi adotado e criou diretrizes para amenizar o impacto ambiental causado pelo desenvolvimento industrial e os moldes de consumo vigentes. Durante sua vigência 40 países se comprometeram em reduzir o efeito estufa em 95% até o ano de 2012, baseado no que ocorria no ano de 1990, porém em 2008 o valor aumentou 20%, demonstrando que o que foi estabelecido anteriormente seria inalcançável pois os perfis de consumo de energia e produção se mantinham os mesmos. Para que as metas estipuladas sejam atendidas seria necessário a otimização dos processos produtivos, os tornando mais eficientes e com menor consumo, e aumentando a quantidade de energia gerada, além de buscar fontes com menor impacto ambiental.

É possível concluir então que a ampliação de projetos de edificações com baixo consumo energético é de extrema importância em um cenário que exige que o consumo de energia seja mínimo e a eficiência dos processos seja máxima. Em um cenário ideal, todos os edifícios existentes, sejam eles provenientes de projetos novos ou readaptados, seriam capazes de gerar *on-site* a mesma quantidade de energia que consomem ao longo do ano e até mesmo exportar o excesso de geração para a rede, para que outros serviços usufruam da energia limpa gerada.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A primeira vez que se abordou o assunto de edifícios com consumo energético nulo foi em 2006, quando um trio de pesquisadores apresentou no congresso *ACEE Summer Study* a pesquisa intitulada *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*. Nessa pesquisa as edificações nZEB foram definidas em quatro tipos diferentes, que são: (TORCELLINI, 2006)

- Net Zero Site Energy: Um edifício ZEB que gera tanta energia quanto consome, quando contabilizado no local da edificação. É preferível que a geração de energia seja *on-site*.

- Net Zero Source Energy: Gera tanta energia quanto consome quando medido na fonte. Para calcular a fonte de energia total de um edifício a energia importada e exportada são multiplicadas por fatores de multiplicação de conversão da fonte apropriados.
- Net Zero Energy Costs: O crédito financeiro recebido pela exportação de energia gerada é pelo menos igual ao que é cobrado nas contas de luz, ou seja, um *NZEB cost* recebe tanto crédito financeiro a ponto de não ter nenhum custo na sua geração de energia elétrica.
- Net Zero Emissions Energy: As emissões não produzidas devido a geração de energia renovável *on-site* devem ser pelo menos iguais as emissões por energia não renovável consumida ao longo do ano.

Em 2006 Griffith et al realizou uma análise de viabilidade de conversão de edifícios comerciais dos Estados Unidos em nZEBs, para tal foi utilizado um método com vários edifícios modelo, afim de caracterizar o setor comercial americano. Concluiu-se que é possível implementar o conceito ZEB para algumas partes significativas do setor comercial. Com as restrições tecnológicas da época foi possível estimar que aproximadamente 22% dos edifícios analisados poderiam se tornar ZEBs. Projetando uma condição favorável para o ano de 2025, considerando novas tecnologias, estimou-se que 64% das edificações analisadas teriam potencial para tornarem-se ZEB. Em casos onde a geração de energia elétrica fosse maior do que a necessária para utilização do edifício, o excedente poderia ser exportado para a rede elétrica, até que em 2025, com projeções, o setor comercial americano poderia gerar até 37% mais energia elétrica do que consome.

A ASHRAE (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado) lançou um plano estratégico em 2008 onde foi definida como meta de desenvolvimento “liderar o avanço de projeto e operação de edifícios sustentáveis”, onde é destacada a importância de edifícios sustentáveis para o meio ambiente e a sociedade, é dito também que “o foco em edifícios energeticamente eficientes deve aumentar, devido ao aumento dos custos de energia, escassez de combustíveis fósseis e impactos ambientais crescentes”. Neste mesmo planejamento estratégico é traçado um plano de visão até o ano de 2020 que trata justamente do desenvolvimento e produção de edificações nZEB. Na visão da ASHRAE, até o ano de 2030, a sociedade já será capaz de produzir edifícios nZEB viáveis economicamente. Para que esse objetivo seja alcançado a ASHRAE se compromete a: desenvolver novas ferramentas através de pesquisas que auxiliem o desenvolvimento de nZEBs; facilitar o uso de novas tecnologias através de publicações e cursos de treinamento; continuamente revisar os recursos relacionados à energia para que produtos antigos e novos se tornem complementares; utilizar relações públicas e marketing para comunicar as tecnologias e benefícios dos edifícios nZEB para a comunidade global de engenheiros, desenhistas, construtores e outros (ASHRAE, 2008).

A Agência Internacional de Energia em 2008 lançou um relatório chamado de “*Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings*”. Nesse relatório, Laustsen analisou os programas de eficiência energética usados no mundo, nesse relatório destacou-se a importância das edificações nZEB no cenário americano. Algumas recomendações para que o potencial de conservação energética presente em nZEBs seja atingido foram feitas, como: Governos, estados ou regiões tem como obrigação determinar, aplicar e atualizar requisitos de eficiência energética para novas edificações, que devem constar em normas de construção baseadas em redução de custos por pelo menos 30 anos; nZEBs e *Passive Houses* – um tipo de edifício que atinge as condições de conforto térmico interno sem a utilização de sistemas de aquecimento ou climatização tradicionais – são referências de edificações para o futuro; Edificações energeticamente eficientes devem ter cargas tributárias removidas para viabilizar construções nos próximos 30 anos; Os modelos de edifícios nZEB deveriam ser implementados primeiramente em órgãos públicos do Governo, servindo como exemplo para os demais edifícios; Também é função do governo anunciar um pacote de medidas para eliminar barreiras para eficiência energética em edifícios novos e já existentes (LAUSTS, 2008).

Laustsen em 2009 apresentou um novo conceito de edificações nZEB, onde o foco é em edificações que fornecem condições de conforto internamente sem o consumo de energia elétrica. Essa nova definição é interessante pois o desenvolvimento e projeto de edificações que não necessitam de energia elétrica para fornecer conforto térmico para seus usuários tornaria, por definição, edifícios nZEB muito mais facilmente alcançáveis, dado o fato de que a climatização de um edifício é responsável por quase metade do consumo energético total (LAUSTSEN, 2009).

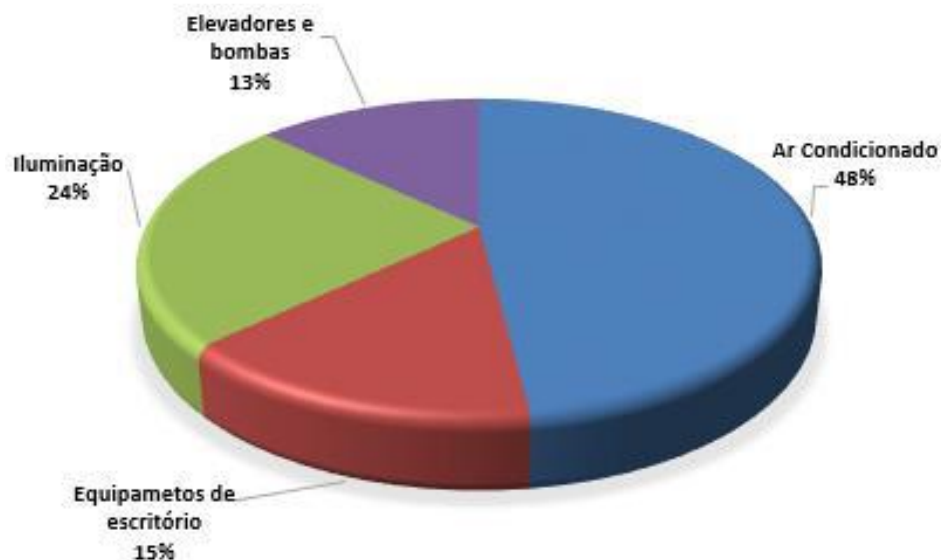


Figura 1.6 – Perfil de consumo em prédios públicos (PROCEL, 2009).

Em 2009 surgiu a primeira definição de casas com consumo energético nulo (*Zero Energy Homes*), como um reflexo da necessidade de redução de consumo de energia elétrica nos Estados Unidos, já que

o consumo energético de residências corresponde a aproximadamente 20% de toda a energia utilizada no país. Essa necessidade de redução de consumo levou ao desenvolvimento de outras fontes de geração e pesquisas em eficiência energética. Parker et al analisou o desempenho de residências de baixa energia e concluiu que casas nZEB já eram viáveis, tanto tecnologicamente quanto economicamente (PARKER, 2009).

Após a definição de edifícios e residências nZEB, Carlisle et al. (2009) definiu as Comunidades de Energia Nula (ZEC), que consistem em comunidades onde as demandas energéticas são muito pequenas, essa demanda reduzida é atingida através de ganhos de eficiência, onde o balanço de energia para veículos, geração de energia elétrica e térmica é equilibrado pela energia gerada através de fontes renováveis. A criação de comunidades de energia nula é mais complexa do que um edifício nZEB pelo fato de que uma comunidade utiliza energia não apenas em edifícios, mas também em indústrias, veículos, infraestrutura, entre outros. O objetivo dessa definição é encorajar projetistas a desenvolver um planejamento a longo prazo para compreender a magnitude das alterações necessárias nos padrões de consumo energético de uma comunidade para atingir uma comunidade de energia nula (CARLISLE, 2009).

Em Toronto, O'Brien (2010) observou um problema relacionando edifícios nZEB e densidade urbana. Concluiu-se que cidades com densidades urbanas baixas aumentam o potencial de geração de energia solar por habitante, já cidades com densidades urbanas altas reduzem o consumo de energia elétrica devido a transportes e residências por habitante (O'BRIEN, 2010).

Foi estabelecido em 2011, durante o *European Council for an Energy Efficient Economy* que até o ano de 2020, a maioria dos países da União Européia devem ter, em média, todas as edificações nZEB. Foi estabelecido também que membros de Estado tem obrigação de elaborar planos nacionais de promoção às edificações nZEB, considerando as diferentes aplicações entre cada edifício. O documento elaborado durante o Conselho é uma revisão das políticas de incentivo à nZEBs, inclusive citando diversos estudos apresentados neste documento.

Considerando um caso de estudo de um condomínio residencial dividido em quatro prédios com 60 apartamentos cada, a área total do empreendimento é de 7.000 m². Durante a fase de projeto, diversas alternativas foram avaliadas relativas à envoltória com o objetivo de minimizar a demanda energética tanto no inverno quanto no verão. Além disso, a construção do complexo foi planejada para maximizar a energia útil, a análise energética do complexo foi simulada com o auxílio do EnergyPlus. Concluiu-se da pesquisa que os custos construtivos e operacionais de um ZEB se tornam economicamente vantajosos, quando comparado a um edifício tradicional dentro de um intervalo de 15 a 20 anos (ADHIKARI, 2012).

Torcellini et al, pioneiros na definição de edifícios energeticamente eficientes, apresentaram em 2014 um estudo destacando que até então, os projetos nZEB eram baseados apenas em análises de viabilidade econômica simples, como *payback* para justificar escolhas de determinadas estratégias de eficiência energética, negligenciando outras decisões de projeto. Mas houve uma mudança na forma de realizar os estudos de viabilidade e recentemente, os projetos empregam abordagens mais abrangentes como justificativa de viabilidade econômica. Essa melhoria de abordagem gerou consequências muito positivas, evidentes na quantidade de projetos de construções que são capazes de atingir nZEB dentro das limitações de orçamento para cada projeto. Para que a maioria dos edifícios existentes sejam nZEB, é necessário demonstrar às empresas de edifícios comerciais que os ZEB podem ser projetados e construídos com baixo custo (TORCELLINI, 2014).

É possível concluir então que a crescente demanda energética, aliada a incentivos a medidas sustentáveis, contrastando com a lenta geração de energia no Brasil, propiciam um ambiente favorável a projetos e implantação de edificações nZEB. Prova disso é a existência do Procel Edifica, que incentiva a eficiência energética, tornando-se assim um berço para que todos os edifícios existentes no território brasileiro sejam nZEB.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo central do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para transformar uma edificação com algumas características, como: edifício comercial, alto, com grande número de pavimentos, climatizado artificialmente e sem uso de ventilação natural; em um nearly-ZEB, ou edifício com balanço energético quase nulo. A esse objetivo central ainda se associam os seguintes objetivos complementares e metas:

- Definir critérios básicos para utilização da metodologia;
- Analisar a situação atual da edificação, desde lâmpadas, luminárias e equipamentos elétricos, passando pelo sistema de climatização, até paredes, janelas, telhado, etc.;
- Propor soluções de engenharia que contribuam com a maximização da eficiência energética para que a edificação opere em regime nearly-ZEB;
- Analisar e propor alternativas de geração de energia elétrica *on-site* provenientes de fontes renováveis;
- Apresentar um estudo de viabilidade econômica para auxiliar na tomada de decisão de implementar ou não o projeto.

1.4 METODOLOGIA

Inicialmente foi feito um estudo sobre a situação atual e futura do consumo de energia elétrica no Brasil bem como suas principais fontes. O mesmo foi feito para a geração de energia elétrica e suas fontes, renováveis ou não.

O conceito nZEB foi definido, acompanhado de uma breve descrição do que é necessário para que uma edificação atinja o nZEB. Logo em seguida alguns exemplos de aplicação foram apresentados. Posteriormente, conceitos de teoria de viabilidade econômica foram abordados, para serem utilizados em um futuro estudo de viabilidade.

Na sequência foram apresentadas diversas estratégias para gerar um aumento na eficiência energética dos edifícios, dividindo as estratégias em alternativas de envoltória, iluminação, climatização e geração de energia elétrica *on-site*.

A metodologia para atingir o conceito nZEB é desenvolvida. Primeiramente, uma visão geral do método é apresentada, através de um fluxograma. Em seguida são definidos níveis de eficiência energética a serem atingidos, bem como critérios básicos mínimos para que a metodologia possa ser aplicada corretamente. A metodologia é dividida em quatro etapas. A primeira é a análise e estudo da situação atual do edifício, fazendo um levantamento das características de envoltória, iluminação e climatização atuais, terminando com uma simulação computacional para obter o consumo energético total do edifício e o perfil de carga térmica. A segunda etapa é a proposição de estratégias para melhorar a eficiência energética do edifício. Após selecionadas as estratégias a serem aplicadas, uma nova simulação é realizada para obter os novos consumos de energia elétrica e carga térmica do edifício. Esses valores são comparados aos atuais para comprovar que as medidas adotadas aumentam a eficiência energética do edifício. A terceira etapa é o estudo de implementação de um sistema de geração de energia elétrica renovável através de fontes renováveis, com o objetivo de estimar a capacidade de geração de um sistema que seja suficiente para complementar o consumo excedente do edifício. Por último é realizada a análise de viabilidade econômica do projeto como um todo, como auxílio na tomada de decisão de implementar o projeto ou não.

Em seguida uma edificação foi escolhida para o estudo de caso. O edifício Brasília Trade Center, situado no Setor Comercial Norte na cidade de Brasília foi selecionado para que a metodologia descrita no capítulo anterior seja aplicada ao caso de estudo. A situação atual do edifício deve ser analisada, obtendo parâmetros como o consumo de energia elétrica, características construtivas, tecnologias de iluminação, sistema de ar condicionado, entre outros.

Finalmente, a metodologia é aplicada ao estudo de caso, no que é um passo-a-passo da metodologia com o objetivo de validá-la. Todas as etapas e passos desenvolvidos na metodologia são repetidos, com

os valores e resultados de cálculos e simulações computacionais apresentados. Ao final concluí-se que a edificação atingiu o balanço energético quase nulo e que é financeiramente viável de ser implementada.

1.5 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O presente trabalho está organizado em 8 capítulos, onde o capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema em estudo e sua importância, a importância da implantação de edifícios com maior eficiência energética e faz uma breve introdução ao conceito de edificações com balanço energético nulo, conhecido como nZEB.

No capítulo 2, o conceito nZEB é definido, apresenta-se os requisitos para um edifício atingir o patamar de balanço energético nulo, qual o caminho a ser percorrido para criar ou transformar um edifício já existente em um caso nZEB, o conceito de balanço energético quase-nulo é definido, quais normas e certificações regem os edifícios nZEB, e alguns exemplos de edificações com balanço nulo já implementados e em funcionamento.

O capítulo 3 apresenta alguns conceitos de engenharia econômica, como valor presente líquido (VLP), taxa interna de retorno (TIR), *payback* e outros. Esses conceitos são importantes para a tomada de decisão e auxiliam no estudo de viabilidade econômica do projeto como um todo.

O capítulo 4 apresenta as quatro principais estratégias para que uma edificação aumente sua eficiência energética e possa se tornar um nZEB, sendo elas: alternativas de envoltória, que englobam desde paredes e telhados até vidros e esquadrias; alternativas de iluminação, onde é avaliado qual o tipo de iluminação mais eficiente no momento; alternativas de climatização, sendo divididas em *retrofit* de edifícios existentes ou tecnologias a serem aplicadas a novos edifícios; e finalmente alternativas de geração de energia elétrica, onde são apresentadas diversas possibilidades de produção de energia renovável, tanto dentro das limitações do edifício quanto a exportação de energia limpa de locais certificados.

O capítulo 5 apresenta a metodologia para que um edifício atinja o balanço energético quase nulo. Essa metodologia foi separada em quatro etapas, a primeira é a análise e estudo da situação atual do edifício. A segunda etapa é a proposição de alternativas de melhoria de eficiência energética do edifício, com o objetivo de diminuir ao máximo o consumo de energia elétrica. A terceira etapa é a de estudo e análise de implementação de um sistema de geração de energia elétrica renovável através de fontes renováveis, com objetivo principal de gerar energia elétrica suficiente para suprir o novo perfil de consumo energético obtido da segunda etapa. A quarta e última etapa é a análise de viabilidade econômica do projeto, onde são obtidos parâmetros que suportam a decisão de implementar o projeto ou não.

O capítulo 6 é uma introdução ao estudo de caso, no qual o edifício selecionado para ser estudado é apresentado e todas as informações uteis são detalhadas, como o número de pavimentos, população fixa, área ocupada, localização geográfica, entre outros. Faz-se o levantamento do consumo de energia elétrica atual do edifício. Em seguida uma análise detalhada da situação atual é realizada, dividida em análise de envoltória, onde é avaliada a qualidade da envoltória instalada; análise de iluminação, onde é avaliado o tipo de iluminação, quantidade de luminárias e lâmpadas, presença de iluminação natural; análise de sistema de ar condicionado, onde é avaliado o sistema como um todo, desde as unidades condensadoras até as unidades evaporadoras, passando por bombas, torres de resfriamento, tubulações, válvulas, entre outros.

O capítulo 7 é a metodologia aplicada ao caso de estudo, onde a metodologia apresentada no capítulo 5 é validada. Pode-se dizer que se trata de um passo-a-passo de como se aplicar a metodologia a um edifício real. Pois, todas as etapas apresentadas na metodologia são aplicadas ao estudo de caso, com seus respectivos valores e resultados. Ao final do capítulo é possível concluir se o balanço energético nulo foi atingido e se o projeto em questão é financeiramente atrativo.

As conclusões finais e propostas para trabalhos futuros estão dispostas no último capítulo.

2. CONCEITO NZEB

Este capítulo aborda o conceito NZEB mais profundamente e mostra como a dificuldade em atingir esse conceito motivou a criação de outra definição. Ao final alguns casos bem-sucedidos são apresentados.

2.1 DEFINIÇÃO DE NZEB

Não é muito fácil definir o conceito NZEB, uma vez que exige a interligação de vários outros conceitos. Mas um entendimento conceitual em comum foi definido de um NZEB como um edifício com alto desempenho energético, capaz de gerar energia a partir de fontes renováveis de modo a compensar sua demanda de energia. (SARTORI, 2012).

Quatro definições diferentes foram criadas e são utilizadas frequentemente: (TORCELLINI, 2006)

- Net Zero Site Energy;
- Net Zero Source Energy;
- Net Zero Energy Costs;
- Net Zero Energy Emissions;

Essas definições são aplicáveis a diferentes casos, explicados a seguir.

Net Zero Site Energy

Um edifício ZEB que gera tanta energia quanto consome, quando contabilizado no local da edificação. É preferível que a geração de energia seja *on-site*. Exemplos de geração são células fotovoltaicas montadas nos telhados do edifício ou garagens, usinas eólicas locais, entre outros.

Uma das limitações dessa definição é que os valores para vários tipos de combustíveis na fonte não são contabilizados, por exemplo, energia elétrica e energia proveniente de gás natural são equivalentes no cálculo do *site*, mas eletricidade é bem mais valiosa na fonte do que o gás natural. Por esse motivo, edificações com alto uso de gás natural devem gerar muito mais energia *on-site* do que uma edificação ZEB.

Uma definição facilmente mensurável é importante para determinar o progresso para atingir o objetivo ZEB. Um *site* ZEB pode ser facilmente verificado através de medições *on-site*, por não ter tantas influências externas. Para um caso *Net Zero Cost* há flutuações nos custos de energia, no caso *Net*

Zero Source e *Net Zero Emissions* a medição não é feita diretamente, porque fatores externos precisam ser determinados.

Net Zero Source Energy

Gera tanta energia quanto consome quando medido na fonte. Para calcular a fonte de energia total de um edifício a energia importada e exportada são multiplicadas por fatores de multiplicação de conversão da fonte apropriados.

Pode haver problemas com essa definição quanto eletricidade é gerada *on site* através da queima de combustíveis fósseis. Pois, por definição, um ZEB deve usar fontes de energia renováveis para atingir o objetivo, portanto, eletricidade gerada de combustíveis fósseis não podem ser exportadas e não entram no cálculo de edifício NZEB.

Net Zero Energy Cost Building

O crédito financeiro recebido pela exportação de energia gerada é pelo menos igual ao que é cobrado nas contas de luz, ou seja, um *NZEB cost* recebe tanto crédito financeiro a ponto de não ter nenhum custo na sua geração de energia elétrica. O crédito recebido tem que compensar a energia, distribuição, demanda de pico, impostos e encargos de medição de eletricidade e gás usado.

No entanto essa definição pode se tornar ineficiente porque as taxas de utilização podem variar muito, dessa forma, um edifício poderia cumprir a meta *NZEB cost* em um ano e no próximo não.

Net Zero Energy Emissions

As emissões não produzidas devido a geração de energia renovável deve ser pelo menos igual as emissões por energia não renovável. Se um edifício totalmente elétrico obtém toda sua eletricidade a partir de uma fonte *off-site*, como hidrelétricas, nuclear, fazendas eólicas, ele já é considerado um edifício com emissão zero e não é necessário gerar toda a energia de fontes renováveis *on-site* para compensar as emissões. Mas se o mesmo edifício utiliza gás natural para aquecimento, então há necessidade de geração e exportação de energia renovável suficiente para zerar a emissão.

Portanto, o sucesso em atingir emissão ZEB depende da fonte de geração da eletricidade utilizada, pois emissões variam muito dependendo da fonte de eletricidade, variando de nuclear, termoelétrica, hidrelétricas, entre outras. Essa definição tem dificuldades de cálculo similares à definição de *Source ZEB*. Boa parte das dificuldades estão relacionadas a incerteza na determinação da fonte de geração de energia.

Um edifício NZEB é um edifício cuja procura de energia primária não-renovável é de 0kWh/(m²ano). (REHVA, 2013). Mas isso não necessariamente significa que um NZEB é um edifício

que não necessita de energias de fontes não-renováveis para se sustentar, mas é um edifício capaz de devolver à matriz energética brasileira a quantidade de energia que foi fornecida. Portanto, um NZEB não é um edifício independente da infraestrutura energética, mas pode ser considerado autossustentável por ser capaz de devolver tudo o que consome.

Sempre que possível um NZEB deve utilizar energia renovável *on-site*, porém fontes de energia renováveis não são constantes, pois nem sempre há condições para gerar a quantidade de energia necessária para suprir a demanda energética do edifício. Sabendo disso, o edifício deve recorrer à energia proveniente da infraestrutura energética. Em períodos onde a geração de energia renovável é bem alta, a ponto de ser superior à demanda do edifício, o excesso de energia pode ser devolvido à rede, com o objetivo de devolver mais energia do que foi consumida pelo edifício.

O balanço NZEB é calculado pela equação (1): (SARTORI, 2012)

$$\text{Consumo de energia elétrica} - \text{Geração de energia elétrica renovável} = 0 \quad (1)$$

Se a expressão (1) for satisfeita, o edifício é considerado um NZEB.

2.2 CAMINHO PARA ALCANÇAR O NZEB

Para atingir o NZEB de um edifício várias atividades multidisciplinares são necessárias, pois vários aspectos como: posicionamento do edifício em relação ao sol, qualidade dos materiais utilizados para sua construção, projeto arquitetônico inicial, forma de geração de energia renovável empregada, entre outros. Com o objetivo de uma construção que seja capaz de ofertar mais energia do que demanda.

O projeto NZEB deve também abordar a eficiência térmica do edifício, dividido em climatização e iluminação. Na parte de climatização é importante considerar o tipo de equipamento de climatização em uso e sua capacidade de refrigeração, a eficiência das paredes e fachadas envidraçadas, a quantidade de aberturas no edifício para cálculo de infiltração de ar, entre outro. Na iluminação deve-se levar em conta o sistema de iluminação, quais equipamentos são utilizados, se esses equipamentos são automatizados, existência de iluminação natural, etc.

O caminho para alcançar o NZEB é dado pelo equilíbrio de duas ações: aumento da oferta de energia proveniente de fontes renováveis e redução da demanda de energia por meio do aumento da eficiência energética, para satisfazer a equação (1). (SARTORI, 2012)

A Figura 2.1, retirada do artigo de (SARTORI, 2012), mostra o caminho para alcançar NZEB. A linha tracejada é a linha de balanço energético nulo, ou seja, se o edifício estiver em cima da linha tracejada, ele é considerado um NZEB, se estiver acima da linha tracejada a geração de energia *on-site*

é maior do que a demanda do edifício, chamado também de *Plus ZEB*, se estiver abaixo da linha tracejada a demanda por energia é maior que a geração *on-site*.

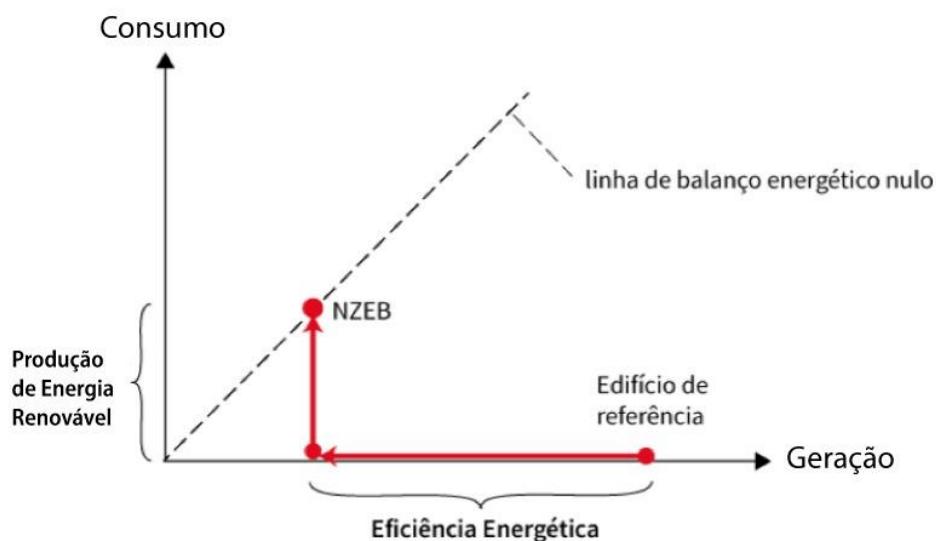


Figura 2.1 - Gráfico representando o conceito do equilíbrio NZEB (Sartori, 2012).

2.3 nZEB – “*Nearly Zero Energy Building*”

Devido as variações climáticas - pouca incidência de luz ao longo do ano - geográficas - pouca disponibilidade de fontes de energias renováveis – e econômicas - condições econômicas que inviabilizam o investimento em projetos com conceito NZEB – muitos locais não reúnem condições suficientes para a construção de edifícios capazes de gerar a mesma quantidade de energia que consomem, mesmo após várias tentativas de implementação.

Essa inviabilidade de construção de edifícios NZEB gerou a necessidade de uma nova definição: edifícios com necessidades quase nulas de energia. O relatório da REHVA (2013) apresenta a seguinte definição de nZEB: “*Edifício com uma procura de energia primária líquida superior a 0 kWh/(m²ano) técnica e razoavelmente alcançável mas não superior ao valor limite nacional de energia primária não renovável. Este valor deve ser alcançado com a melhor combinação de prática de medidas de eficiência energética e tecnologias de energia renovável, que podem ter ou não um nível ótimo de rentabilidade.*” (REHVA, 2013).

Define-se neste trabalho que nZEB é um edifício que alcança um nível de eficiência energética entre 75% e 100% (NZEB) do consumo de energia elétrica original do edifício, através de medidas de melhoria de eficiência energética e implementação de sistemas de geração de energia elétrica através de fontes renováveis.

2.4 NORMAS E CERTIFICAÇÕES

No que diz respeito às normas aplicáveis a edificações nZEB, a norma ASHRAE/ANSI/USGBC 189.1 estabelece diretrizes projeto e construção de edificações de alta performance, conhecidos também como *Green Buildings*. A EPBD Recast (*Energy Performance of Buildings Directive Recast*), inspirada no Protocolo de Quioto e aplicável na Europa, estabelece diretrizes para edificações nZEB.

No Brasil, a Eletrobras, por meio do Procel Edifica 2017, tem como objetivo: divulgar e estimular a aplicação dos conceitos de eficiência energética em edificações; apoiar a viabilização da Lei de Eficiência Energética; contribuir com a expansão do setor de edificações do país de forma energeticamente eficiente, reduzindo custos operacionais na construção e manutenção das edificações. Para isso, a Eletrobras coordena o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações, conhecido como PBE Edifica.



Figura 2.2 - ENCE geral de projeto e ENCE geral da Edificação Construída (BRASIL, 2017).

Criada pelo USGBC (*United States Green Building Council*), a certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) é considerada o principal selo para edificações no mundo. A LEED é um sistema internacional de certificação ambiental para edifícios, atualmente utilizado por mais de 160 países, tem como objetivo incentivar a sustentabilidade nos edifícios comerciais. Essa certificação é válida para qualquer edifício e pode ser aplicada a qualquer momento no empreendimento, não apenas em edificações em construção.

Projetos que buscam a certificação LEED são analisados em 8 esferas, são elas: localização e transporte, materiais e recursos, eficiência no uso de água, energia e atmosfera, sites sustentáveis, créditos prioritários regionais e inovação; onde todas possuem pré-requisitos (práticas obrigatórias) e créditos (recomendações) que a medida que são atendidos contemplam a edificação com pontos. O nível

da certificação é definido conforme a quantidade de pontos adquiridos pelas edificações, os níveis são divididos em: Certificado, Silver, Gold e Platinum, variando de 40 a 110 pontos.



Figura 2.3 - Níveis de Certificação LEED (EUA, 2017).

Obter a certificação LEED traz inúmeros benefícios. No contexto ambiental podemos salientar a redução do consumo de água e energia, a atenuação dos efeitos causados por mudanças climáticas; reciclagem dos resíduos da construção e operação, e uso inteligente de tecnologias e materiais gerando baixo impacto ambiental. No contexto social há a priorização da saúde e segurança dos ocupantes; capacitação profissional, e conscientização de trabalhadores e usuários; o fomento a fornecedores com responsabilidades socioambientais; e o incentivo a políticas públicas de construção sustentável. No contexto econômico há valorização do imóvel, redução dos custos operacionais, prolongamento da manutenção e modernização da edificação. Esses são alguns fatores relevantes para quem obtém a certificação.

Em território europeu existe atualmente um conjunto de requisitos, análogo a certificação LEED, para uniformizar os conceitos de quantificação e certificação, que estabelece que até 2020 todos os edifícios, públicos ou privados, sejam nZEB.

2.5 PROJETOS nZEB

A maior parcela de projetos nZEB implementados com sucesso estão na Europa e Estados Unidos. Tendo isso em vista, as principais edificações analisadas a seguir encontram-se nessas regiões, que ao utilizarem geração de energia *on-site* obtiveram o balanço energético nulo. Universidades de diversos países também tem mostrado investimentos no estudo e desenvolvimento de edificações experimentais para uma melhor e mais precisa formulação de como se atinge o balanço energético nulo.

Através do “*Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*” disponível na internet, várias edificações nZEB e construções com alta eficiência energética são descritas, além de acesso às soluções adotadas em cada projeto e como o resultado desejado foi atingido.

O edifício *Green Office Meudon*, localizado em Paris, França, é fruto da empresa Ateliers 115 Architectes e foi construído pela Bouygues em 2010. Projetado para atingir o melhor desempenho

energético possível, vinte e três mil e trezentos metros quadrados de área útil são divididos em 7 andares. Suas fachadas principais foram construídas com quarenta por cento de vidraças e os outros sessenta por cento com superfícies opacas, equilibrando luz natural e radiação incidente. Além disso, quarenta estações para carregamento de veículos elétricos, terraço com jardim de quinhentos metros quadrados e dois terraços de madeira de seiscentos metros quadrados estão disponíveis.

A geração de energia elétrica do edifício é mista, sendo aproximadamente 45% da energia proveniente de painéis fotovoltaicos cobrindo aproximadamente 4200 metros quadrados dispostos em diversos lugares da planta, como cobertura, telhado, estacionamento, fachadas e até mesmo nas persianas das janelas. Os outros 55% são gerados através de uma central de geração e cogeração, constituídos de um grupo motor-gerador que fornece energia elétrica e calor.

A energia elétrica consumida é de aproximadamente 62 kWh/m² por ano e a geração é de aproximadamente 64 kWh/m² por ano, portanto atinge a definição de nZEB mostrada anteriormente. O excedente de energia é vendido à concessionária da região.



Figura 2.4 - Edifício Green Office Meudon (Green Office® Meudon, 2011).

O edifício Pearl River Tower, localizado em Guangzhou, China, é um edifício comercial de diversas finalidades. Construído em 2012 possui uma área útil de 212.615 metros quadrados, divididos em 71 andares. A geração de energia elétrica é feita por pás eólicas localizadas estrategicamente nas curvas presentes nas fachadas do prédio, que direcionam o vento até os geradores eólicos por meio de um “funil”, aumentando a velocidade do vento em até 250%. Isso gera um aumento na geração de energia

de até 15 vezes se comparado a unidades eólicas isoladas. Também é adotada geração através de células fotovoltaicas localizadas na cobertura do prédio e nas persianas do prédio.

O mesmo ar utilizado para movimentar as pás eólicas é circulado entre as paredes do edifício, dispensando o uso de sistemas de ar condicionado. Vidros de tripla camada são usados na fachada e luz natural controlada através de persianas automatizadas contribuem para uma baixa carga térmica. Por depender única e exclusivamente de vento para que exista geração de energia elétrica e também climatização, o edifício tem dificuldades em atingir o balanço energético nulo em alguns meses do ano, devido às irregularidades de vento no local, porém, ao longo do ano a geração de energia é maior que o consumo do edifício, cumprindo a definição nZEB.



Figura 2.5 - Turbina Eólica do edifício Pearl River Tower (Owings & Merrill LLP, 2012).



Figura 2.6 – Edifício Pearl River Tower (Owings & Merrill LLP, 2012).

O *Brock Environmental Center*, localizado em Virginia Beach, Virginia, Estados Unidos, é um edifício criado para atingir a certificação “*Living Building Challenge*”, uma das mais avançadas de edifícios sustentáveis, onde para atingi-la é necessário ter balanço nulo de energia, consumo de água e resíduos.

O centro é o primeiro edifício dos Estados Unidos a captar água da chuva e tratá-la para água potável para consumo humano. A geração de energia elétrica é feita através de placas fotovoltaicas e turbinas eólicas residenciais que produzem quase duas vezes mais energia do que é consumida. Ventilação natural é adotada para lidar com ventos bidirecionais, com janelas e até paredes desenvolvidas para abrirem automaticamente e aproveitar o fluxo de ar.

O edifício foi desenhado para maximizar a iluminação difusa vinda do Norte enquanto protege o interior do prédio da incidência direta de luz solar vinda do Sul. O sistema de climatização mecânico é feito através de um sistema com fluxo de refrigerante variável, VRF com poços geotérmicos. Todas essas medidas de aumento de desempenho energético resultaram em um edifício que gera 83% mais energia do que consome, aonde o consumo é de apenas 49 kWh/m² por ano.



Figura 2.7 – Brock Environmental Center (Chesapeake Bay Foundation, 2014).

O BedZED (*Beddington Zero Energy Development*), localizado em Londres, Inglaterra, é um empreendimento de uso misto, construído em 2002. Onde a maioria da área útil ocupada é para moradia e também há incentivo para um estilo de vida mais sustentável. Eletricidade, aquecimento e abastecimento de água foram projetados de forma cuidadosa para produzirem sua própria energia.

A geração de energia elétrica é feita através de células fotovoltaicas e um sistema central de cogeração, denominada CHP (“Combined Heat and Power”), usando a madeira local rejeitada pela indústria para queima, o gás gerado pela queima alimenta um gerador elétrico e o calor gerado também é aproveitado em um sistema de aquecimento de ciclo fechado. A geração total de energia é de 82 kWh/m² por ano e toda energia é consumida pelo empreendimento, tornando-se uma edificação nZEB.



Figura 2.8 – BedZED (Zed Factory, 2002).

A fábrica da Medice, localizada na Alemanha, teve mais de 1 milhão de euros investidos para um sistema de produção combinada de calor e potência, com uso de placas fotovoltaicas, chillers de absorção e trocadores de calor adiabáticos. Com isso foi possível atingir a autossuficiência na geração de eletricidade, calor e frio. A partir do planejamento inicial até o término da instalação foi necessário apenas 1 ano. A economia de consumo de energia elétrica com chillers de absorção é aproximadamente 250.000 kW por ano, uma economia de até 42.000 euros. O investimento tem um *payback* estimado de quatro anos e meio.



Figura 2.9 – Fábrica da Medice (Medice, 2010).

A Universidade de São Paulo (USP) tem como projeto o Centro de Estudos de Clima e Ambientes Sustentáveis (CECAS), parceria entre o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) e a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU). O edifício terá uma área útil de 6000 metros quadrados, divididos em um subsolo, térreo, três andares e a cobertura.

O edifício terá 100% de sua energia gerada *on-site*, provenientes principalmente de placas fotovoltaicas, com outras opções de geração ainda em estudo. Também estão previstos o controle da radiação solar por meio de protetores solares externos automatizados, otimização de iluminação e ventilação natural com controle automatizado, captação de água da chuva para reaproveitamento em banheiros e irrigações de jardim, coletores solares para aquecimento de água em chuveiros e lavatórios, entre outros dispositivos de aumento do desempenho energético do edifício.



Figura 2.10 – Centro de Estudos de Clima e Ambientes Sustentáveis (USP, 2008).

Tabela 2.1 - Resumo das soluções empregadas nos edifícios nZEB

EDIFÍCIO	LOCALIZAÇÃO	SOLUÇÕES		
		GERAÇÃO	CONFORTO TÉRMICO	CLIMATIZAÇÃO
Green Office Meudon	Paris, França	Painéis fotovoltaicos Central de geração e cogeração	Fachada com 40% vidraças e 60% superfícies opacas neutralizando a radiação incidente	
Pearl River Tower	Guangzhou, China	Pás Eólicas Células fotovoltaicas	Vidros de tripla camada Persianas automatizadas	Aproveitamento do ar utilizado para movimentar as pás eólicas, dispensando sistemas de ar condicionado
Brock Environmental Center	<i>Living Building Challenge</i>	Turbinas eólicas Placas fotovoltaicas	Ventilação natural Janelas com abertura automática para aproveitar o fluxo de ar	Sistema de climatização mecânico tipo VRF
BedZED (Beddington Zero Energy Development)	Londres, Inglaterra	Células fotovoltaicas Central de cogeração CHP		Aproveitamento do calor gerado pelo CHG em um sistema de aquecimento de fluxo fechado
Fábrica da Medice	<i>Alemanha</i>	Placas fotovoltaicas Trocadores de calor adiabáticos		Chillers de absorção
Universidade de São Paulo	<i>São Paulo, Brasil</i>	Placas fotovoltaicas	Controle de radiação solar por meio de protetores solares externos automatizados	Ventilação natural com controle automatizado

3. TEORIA DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Este capítulo apresenta alguns conceitos econômicos importantes para serem utilizados no estudo de viabilidade a ser realizado posteriormente. Serão abordados os indicadores payback, valor presente líquido, taxa interna de retorno, entre outros.

3.1 VIABILIDADE ECONÔMICA

O objetivo de um estudo de viabilidade é apresentar uma análise econômica para análise de viabilidade de projetos, esse estudo de viabilidade é feito através de diversos métodos de avaliação de projetos, que quando aplicados resultam em um número, que expressa a rentabilidade do projeto. Os resultados obtidos pela análise não devem ser considerados individualmente, mas sim analisados em conjunto com outros parâmetros, no processo chamado de tomada de decisão, afim de justificar o investimento nas diversas alternativas de *retrofit* obtidas no processo de análise de eficiência energética do edifício em estudo. Os métodos de avaliação de projetos foram adaptados de (QUIZA, 2011) e são discutidos com mais detalhes nos itens a seguir.

3.2 TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE (TMA)

Os métodos da Engenharia Econômica para avaliação de alternativas de investimento têm como principal característica o reconhecimento da variação do valor do dinheiro no tempo.

Esse reconhecimento resulta na necessidade de uma taxa de juros ser aplicada a análise de alternativas. Essa taxa de juros é denominada taxa mínima de atratividade, que representa a rentabilidade mínima aceitável para qualquer aplicação, sendo considerada como uma base para aceitação ou rejeição de propostas de investimento. O exemplo a seguir ajuda a definir qual a taxa a ser aplicada a um investimento:

Uma oportunidade de investimento surgiu para uma pessoa, mas para que ela se concretize é necessário pegar dinheiro emprestado de um banco. Obviamente o banco cobrará juros aplicados a esse dinheiro, o que é considerado um ônus, mas deve ser entendido como o custo de utilização desse capital. A pessoa só estará interessada na oportunidade de investimento se a expectativa de ganhos, já contando com a dedução do valor do investimento, for superior ao custo do capital. No caso exemplificado, se o montante de juros pagos corresponder a uma taxa de 33% ao ano, o custo do capital será este valor, e o investimento só se torna interessante se os rendimentos produzidos pela oportunidade de investimentos forem superiores ao custo do capital.

3.3 VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

O valor presente líquido se resume em calcular o valor presente de cada um dos termos de um fluxo de caixa, aplicados a uma taxa de juros qualquer e depois somá-los. Deve-se interpretar o VPL como o valor atual de um projeto. O VPL é dado pela equação (2)

$$VPL = \sum_{j=0}^m FC_j (1 + i)^{-j} \quad (2)$$

onde,

m é o número total de períodos do fluxo de caixa;

i é a taxa de juros aplicada;

FC_j é o valor do fluxo de caixa em um período

3.4 PAYBACK

Payback, ou período de recuperação descontado deve ser interpretado como o tempo necessário para que o projeto atinja seu ponto de equilíbrio, ou seja, recupere os investimentos realizados. Para descobrir esse tempo necessário basta igualar a equação (2) a zero ($VPL = 0$) para encontrar o valor “ j ” no qual o valor presente líquido dos termos de um fluxo de caixa até o período “ j ” é nulo. (QUIZA, 2011)

A aplicação do *payback* é interessante quando se quer fazer uma análise de aquisição e substituição de ativos, e também na determinação do custo equivalente anualizado de ativos, considerando-se o investimento realizado para aquisição, a vida útil, o custo de manutenção, o custo de operação e outras despesas, como seguros, despesas de financiamento, entre outras.

O *payback* é um método bem recebido por investidores de projetos que apresentam um fluxo de caixa de longa duração, com fases de investimento e recuperação bem definidas, como: Shopping Centers, locação de imóveis, projetos de infra-estrutura, como saneamento, telefonia, e análise de viabilidade de *retrofit* e revitalização de imóveis.

Como exemplo será estudado o *payback* de um projeto com horizonte de operação de 13 períodos, considerando-se uma taxa de juros de 10% ao período. A Tabela (3.1) e a Figura (3.1) descrevem o exemplo.

Tabela 3.1 - Fluxo de caixa de um projeto (adaptado de Quiza, 2011).

n	CAIXA (\$)		i = 10% a.p		
	SAÍDAS	ENTRADAS	Fluxo de caixa (FC)	VP dos termos do FC	VPL acumulado
0	120000		-120000	-120000	-120000
1	60000	30000	-30000	-27273	-147273
2	50000	40000	-10000	-8264	-155537
3	50000	70000	20000	15026	-140511
4	50000	70000	20000	13660	-126851
5		70000	70000	43465	-83386
6		40000	40000	22579	-60807
7		30000	30000	15395	-45412
8		30000	30000	13995	-31417
9		30000	30000	12723	-18694
10		30000	30000	11566	-7128
11		30000	30000	10515	3387
12		30000	30000	9559	12946
13		30000	30000	8690	21636
	330000	530000	200000	21636	VPL do Projeto

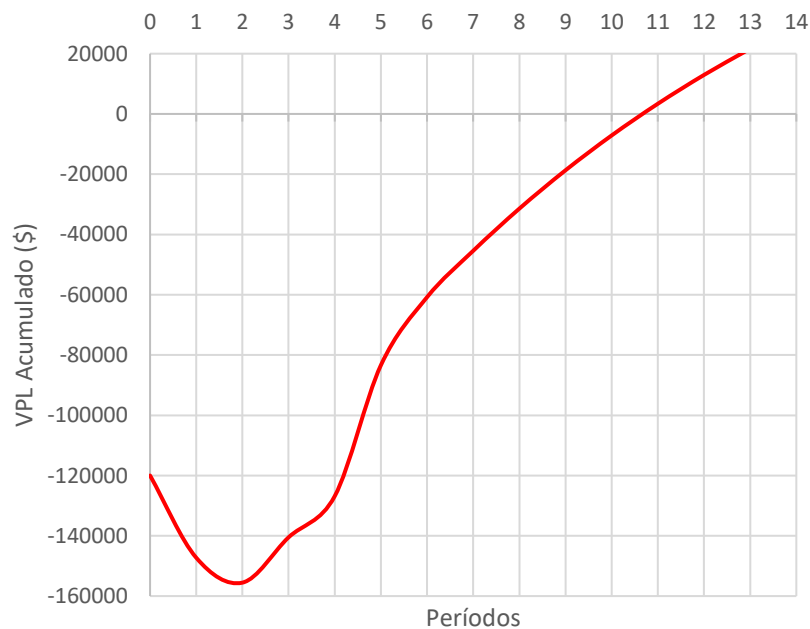


Figura 3.1 - Evolução do VPL Acumulado do Projeto a Cada Período (adaptado de Quiza, 2011).

Pela Tabela (3.1) é possível concluir que o VPL acumulado deixa de ser negativo para se tornar positivo entre o 10º e o 11º período, portanto, isso indica que o *payback* do projeto é um pouco menos de 11 períodos.

Analisando a Fig. (3.1), a etapa do projeto onde os primeiros períodos do projeto apresentam contínuas reduções do VPL acumulado é denominada fase de investimentos. Ao atingir o valor mínimo do VPL acumulado, a etapa conhecida por fase de recuperação começa, onde os termos do fluxo de caixa são positivos. O *payback* pode ser observado pela interseção dos eixos de VPL acumulado e Período, essa interseção aponta o valor de “*n*” que resolve a equação ($VPL = 0$).

Um mesmo projeto pode apresentar diferentes prazos de recuperação, em função da taxa de juros empregada para desconto do seu fluxo de caixa. Ou seja, à medida que a taxa mínima de atratividade aumenta, a rentabilidade dos investidores aumenta e conseqüentemente o *payback* do projeto também aumenta, até o momento que a taxa de juros demandada pelos investidores gera um *payback* superior ao chamado horizonte de projeto, formado pela vida útil e o horizonte operacional do projeto, tornando-o inviável. No exemplo acima esse ponto seria atingido para uma taxa de juros de 12,17% a.p, valor esse que gera um *payback* equivalente ao seu horizonte de projeto de 13 períodos.

Pode-se chegar as seguintes conclusões em relação ao *payback* em função da taxa mínima de atratividade: reduções da taxa mínima resultam em viabilização de projetos anteriormente inviáveis; elevações da taxa mínima inviabilizam projetos que anteriormente eram viáveis. Ou seja, há uma grande sensibilidade da viabilidade de projetos às taxas de juros aplicadas pelos investidores.

3.5 TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)

A taxa interna de retorno é o valor da taxa de juros que torna o valor presente líquido do fluxo de caixa nulo. Pode ser interpretado como a rentabilidade do projeto. Para ser compreendida melhor, retornamos à definição de Taxa Mínima de Atratividade (TMA): “*é a taxa de juros mínima para que o investimento de um projeto se torne interessante*” (QUIZA, 2011).

No exemplo abaixo, uma pessoa solicita um empréstimo de R\$1.000,00 ao banco, devolvendo a quantia em 6 parcelas mensais de R\$200,00, a Taxa Interna de Retorno é calculada por:

$$1000 = 200 \cdot \frac{(1+i)^6 - 1}{i \cdot (1+i)^6} \rightarrow i = 5,47\% \quad (3)$$

Portanto, se para o banco existem oportunidades de investimento do seu capital (TMA) maiores que 5,47%, o investimento proposto pela pessoa não é interessante.

É importante ressaltar que a aplicação da Taxa Interna de Retorno pode levar a resultados e análises instáveis, sendo indicada para análises de projetos com fluxo de caixa de no mínimo 8 anos, com fase de investimento curta comparada à fase de recuperação, o que resulta em uma mudança de sinal do VPL acumulado do projeto lenta.

3.6 ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE (IL) E TAXA DE RENTABILIDADE (TR)

O Índice de Lucratividade é calculado pela razão entre o valor presente do fluxo de entradas e o valor presente do fluxo de saídas.

A Taxa de Rentabilidade consiste na relação entre o VPL, determinado a partir da taxa mínima de atratividade e o valor presente do fluxo de saídas de capital.

Há uma relação entre IL e TR, apresentada pelas equações a seguir.

$$IL = \frac{VP_{ENTRADAS}}{VP_{SAÍDAS}} \quad e \quad TR = \frac{VPL}{VP_{SAÍDAS}} \quad (4)$$

$$VPL = VP_{ENTRADAS} - VP_{SAÍDAS} \quad (5)$$

Logo,

$$IL = \frac{(VPL + VP_{SAÍDAS})}{VP_{SAÍDAS}} = \frac{VPL}{VP_{SAÍDAS}} + 1 \quad ou \quad (6)$$

$$IL = TR + 1$$

3.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE PROJETOS

Uma alternativa de investimento de capital é considerada financeiramente atrativa quando se observa:

VPL positivo; ou

TIR superior ou igual à taxa mínima de retorno demandada (TMA); ou

IL maior ou igual a 1, que equivale a uma TR positiva.

A análise de *payback* é diferente, pois por definição ele indica quantos períodos são necessários para que o investimento seja recuperado, considerando uma taxa mínima de atratividade. Se o valor de *payback* estiver abaixo da vida útil do projeto, ele é viável, pois o VPL tornará positivo antes do horizonte de projeto. Porém, mesmo com essa viabilidade de projeto aparente, a quantidade de períodos para que o retorno do investimento seja atingido pode não interessar o investidor, portanto, passa a se tornar uma decisão informal, pois não é baseada apenas nos métodos aqui apresentados.

4. ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS PARA ALCANÇAR nZEB

Este capítulo apresenta diversas estratégias e tecnologias disponíveis com alta eficiência energética para que uma edificação possa se tornar nZEB, tanto no âmbito da climatização, como também iluminação, alternativas de envoltória e geração de energia elétrica renovável.

4.1 SOLUÇÕES DE EFICIENCIA ENERGETICA

É crucial compreender que a eficiência energética deva ser o objetivo principal durante a fase de projeto de um edifício nZEB, para que uma boa relação custo-benefício seja atingida, deve ser realizada uma otimização de parâmetros do edifício, como: envoltória, iluminação, sistemas de ar-condicionado, geração de energia elétrica através de fontes renováveis, entre outros.

Nas diferentes definições de conceitos nZEB, um mesmo caminho para atingí-lo é comum a todos os conceitos. Primeiro reduzir as necessidades energéticas do edifício, utilizando tecnologias de eficiência energética e, segundo fazer uso de fontes de energia renováveis para geração de energia. Para se alcançar o nZEB é necessário identificar o equilíbrio entre a eficiência energética e a produção de energia renovável, como mostrado na Fig. (4.1).

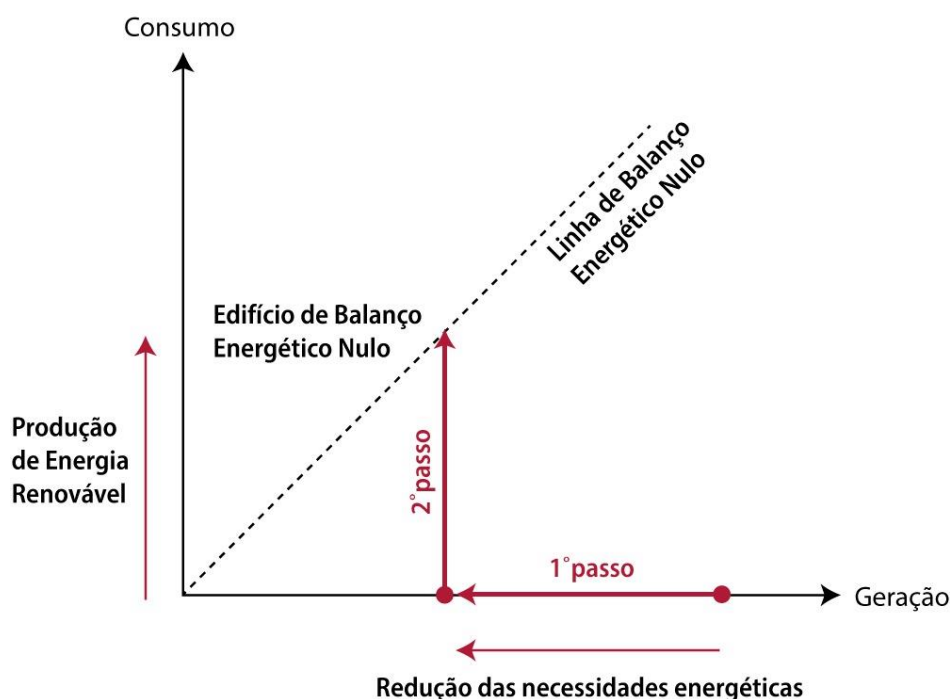


Figura 4.1 - Estratégias para alcançar nZEB (Adaptado de Sartori, 2012)

Como uma estratégia de reduzir o consumo energético em edifícios, 4 estratégias diferentes são propostas, são elas:

1. Aplicação de sistemas eficientes;
2. Estratégias bioclimáticas;
3. Integração urbana;
4. Tecnologias de eficiência energética;

Sendo a solução ótima para melhoria de eficiência energética do edifício a aplicação dos quatro níveis, como mostra a Fig. (4.2).



Figura 4.2 - Estratégias para aumentar a eficiência energética

Em um projeto de um edifício, deve-se levar em conta o conceito de eficiência energética já nas fases iniciais, isso significa que a partir da fase de projeto arquitetônico já é necessário adotar alternativas eficientes energeticamente. Caso contrário, decisões incorretas feitas no início do projeto podem acarretar em soluções caras ou até impossíveis se tratando de uso de energia.

Outros fatores importantes a serem considerados são infiltrações de ar exterior, sombreamento sobre o edifício, incidência de luz solar e até a mudança de layout na fase de construção do edifício que pode influenciar no sistema de climatização, fazendo-se necessário projetá-lo de maneira flexível.

A Figura (4.3) apresenta a ordem correta das etapas a serem realizadas para se atingir o nZEB.



Figura 4.3 - Etapas para se atingir o nZEB

É possível concluir que projetar um edifício, com todas as suas dificuldades já existentes, com o intuito de torná-lo um nZEB é uma tarefa complexa, com diversas áreas de conhecimento aplicáveis e inúmeras decisões de projeto a serem realizadas.

De maneira a facilitar um pouco essas decisões, é apresentado a seguir um conjunto de alternativas possíveis para aumentar a eficiência energética e diminuir o consumo energético em um edifício.

4.2 ALTERNATIVAS DE ENVOLTÓRIA

Para que um edifício possa ser considerado um nZEB, é necessário que sua envoltória seja o mais eficiente possível. A envoltória de um edifício é composta por fechamentos opacos (paredes e telhados) e fechamentos transparentes (vidros e janelas) ou translúcidos (portas e aberturas).

De acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (BRASIL, 2013), a eficiência da envoltória de um edifício é influenciada pelos materiais utilizados, tendo como principais fatores influentes na eficiência energética as características físicas dos materiais construtivos, como: a absorvância (α) e a transmitância térmica (U) dos fechamentos opacos e translúcidos. Segundo (LAMBERTS, 2004), “através da transmitância térmica pode-se avaliar o comportamento de um fechamento opaco frente à transmissão de calor”.

4.2.1 ABSORTÂNCIA

A absorptância à radiação solar (α) é o quociente de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. (BRASIL, 2013). Segundo (LAMBERTS, 2004), “os materiais de construção são seletivos à radiação de ondas curtas, e a principal determinante desta característica é sua cor superficial”. A Tabela (4.1) apresenta o percentual de absorptância com relação à cor do material de construção.

Tabela 4.1 - Absortância em Função da Cor do Material Construtivo (Lamberts, 2004)

Cor	Absortância (α)
Escura	0,7 a 0,9
Média (Tijolos)	0,5 a 0,7
Claros	0,2 a 0,5

A Tabela (4.2) apresenta os índices de absorptância de alguns materiais comuns utilizados na construção civil.

Tabela 4.2 - Índice de absorptância de alguns materiais (ABNT, 2003)

Material	Absortância (α)
Chapa de Alumínio (Nova e Brilhante)	0,05
Chapa de Alumínio (Oxidada)	0,15
Concreto Aparente	0,65/0,80
Telha de Barro	0,75/0,80
Tijolo Aparente	0,65/0,80
Reboco Claro	0,30/0,50
Revestimento Asfáltico	0,85/0,98
Vidro Incolor	0,06/0,25
Vidro Tingido	0,40/0,80
Pintura Branca	0,20
Pintura Amarela	0,30
Pintura Verde Clara	0,40
Pintura Verde Escura	0,70
Pintura Vermelha	0,74
Pintura Preta	0,97

4.2.2 TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

De acordo com o RTQ-C (BRASIL, 2013), a transmitância térmica se refere a “transmissão de calor em unidade de tempo através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo”, ou $W/m^2.K$. Podendo ser calculada utilizando o método presente na norma NBR 15220-2.

Quando se fala de eficiência energética em edificações, a transmitância térmica é o fator determinante que possibilita que as diversas opções de fechamento sejam comparadas. Pois é possível

entender as diferenças entre fechamentos opacos e translúcidos. Por exemplo, aberturas possuem baixíssima resistência térmica mas possuem ótima transmitância térmica.

A Tabela (4.3) apresenta os índices de transmitância térmica de alguns materiais utilizados na construção civil.

Tabela 4.3 - Índices de transmitância térmica de alguns materiais (ABNT, 2003)

Material	Transmitância Térmica U (W/m².K)
Argamassa comum	1,15
Argamassa de gesso	0,70
Tijolos e telhas de barro	0,70/1,05
Concreto normal	1,75
Madeira	0,12/1,15
Metal (alumínio)	230
Plásticos (borrachas sintéticas, poliéster, poliamidas, polietilenos)	0,40
Vidro comum	1,0
Lã de rocha	0,045
Lã de vidro	0,045
Espuma rígida de poliuretano	0,030

Utilizar materiais considerados como isolantes térmicos, como a lã de rocha, lã de vidro, espuma rígida de poliuretano e até mesmo a madeira em certo nível, auxilia na redução nas perdas e ganhos de calor do edifício, e conseqüentemente melhorando a eficiência energética do mesmo.

Por se tratar de um assunto pesquisado a fundo pela Arquitetura, neste trabalho nos restringiremos a apresentar a Tab. (4.4), que apresenta alternativas de envoltórias de alta eficiência energética, com a possibilidade de comparação entre as alternativas de envoltória através dos seus respectivos valores de transmitância térmica.

Tabela 4.4 - Alternativas de Envoltória

Componente de Envoltória	Alternativas de Envoltória
Paredes	Paredes Trombe
	Paredes de Concreto Leve
	Paredes Ventiladas ou Paredes de Dupla Camada
	Paredes com Armazenamento de Calor Latente
Fenestração	Envidraçados a base de Aerogel
	Envidraçados duplos à vacuo
	Envidraçados refletivos, com ou sem escurecimento automático
	Envidraçados com filme de partículas suspensas
	Envidraçados com elementos óticos holográficos
	Molduras e espaçadores
Coberturas	Coberturas de alvenaria
	Coberturas de baixo peso (LASRS)
	Coberturas ventiladas e micro-ventiladas
	Coberturas em forma de abóbadas
	Coberturas com refletividade solar
	Coberturas verdes
	Coberturas com células fotovoltaicas
	Coberturas com sistemas de isolamento térmico
	Coberturas com resfriamento evaporativo
Isolamento Térmico	Isolamento térmico de materiais inorgânicos com material celuloso
	Isolamento térmico de materiais inorgânicos com material fibroso
	Isolamento térmico de materiais orgânicos com material celuloso
	Isolamento térmico de materiais orgânicos com material fibroso
	Isolamento térmico com membranas metálicas/metalizadas refletivas
	Isolamento térmico com materiais avançados (aerogel)
	Painéis isolantes à vacuo
	Painéis estruturalmente isolados
	Inércia térmica
	Materiais com mudança de fase
Infiltração de Ar Exterior e Estanqueidade	Camada de controle de vapor (VCL)
	Camada de barreira de vento (WBL)
	Concreto fundido
	Painéis de tiras de madeira orientadas (OSB)
	Aplicação de gesso ou revestimento de purga direto na mistura do concreto

4.3 ALTERNATIVAS DE ILUMINAÇÃO

Os sistemas de iluminação no Brasil representam cerca de 20% da energia elétrica total consumida no país, sendo responsável por 24% do consumo residencial, 44% do consumo no comércio e 1% do consumo nas indústrias (SANTOS, 2006).

Analisando esses dados, percebe-se um grande potencial de redução de consumo energético nesses sistemas, não se limitando apenas à substituição de lâmpadas antigas por novas mais eficientes, mas sim, realizando uma adequação no ambiente visando a qualidade do sistema.

De acordo com os elementos que compõem um sistema de iluminação e seu uso adequado, é possível identificar diversas estratégias de eficiência energética que contribuam para redução no consumo energético desses sistemas, como:

- Utilização dos elementos (lâmpadas, luminárias e reatores) de acordo com o ambiente no qual serão empregados e as atividades realizadas, garantindo boas condições de visibilidade;
- Selecionar o tipo de lâmpadas mais adequado, levando em consideração sua vida média, consumo e preço, optando pelas que contêm o selo Procel de Economia de Energia;
- Minimizar o tempo de utilização da iluminação através da conscientização dos usuários, evitando desperdícios e com o uso de tecnologias de controle de iluminação, como sensores de presença, etc;
- Tirar proveito da iluminação natural sempre que possível, e complementar a iluminação natural com artificial;
- Adotar circuitos independentes, que contribuem para a utilização das lâmpadas que realmente são necessárias, permitindo iluminação parcial de ambientes.

No Brasil, a norma ABNT NBR 5413 – Iluminância de interiores, fixa os valores de iluminâncias mínimas de acordo com o local e sua aplicação para a realização de projetos luminotécnicos. Iluminância se refere ao fluxo luminoso que incide em determinada área de superfície, sendo medida em lux. A Tabela (4.5) apresenta os valores de iluminância recomendadas por classes de tarefas visuais.

Tabela 4.5 - Iluminâncias por classe de tarefas visuais (ABNT, 1992)

Classe	Iluminância (lux)	Atividade
A Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples	20 - 30 - 50	Áreas públicas com arredores escuros
	50 - 75 - 100	Orientação simples para permanência curta
	100 - 150 - 200	Recintos não usados para trabalho contínuo, depósitos
	200 - 300 - 500	Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditórios
B Iluminação geral para área de trabalho	500 - 750 - 1000	Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios
	1000 - 1500 - 2000	Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas
C Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis	2000 - 3000 - 5000	Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno
	5000 - 7500 - 10000	Tarefas visuais muito exatas, montagem de microeletrônica
	10000 - 15000 - 20000	Tarefas visuais muito especiais, cirurgia

Além da iluminância, o conforto visual dos ocupantes está intimamente relacionado a outras características do sistema de iluminação, como o índice de reprodução de cores (IRC), temperatura de cor correlata (TCC), ofuscamento, uniformidade, entre outros. Todas essas características servem como indicativos da qualidade da iluminação do local (ALVAREZ, 1998).

O IRC retrata como as cores dos objetos são reproduzidas pela fonte luminosa, variando entre 0 e 100, quanto menor o valor, pior a reprodução de cores, e quanto maior o valor, melhor a concordância entre as cores, se aproximando mais da realidade. O TCC representa a cor de determinada fonte de luz, medida em Kelvin, varia entre 1500K e 9000K, quanto maior o índice, mais fria será a cor emitida pela fonte luminosa. O ofuscamento é o incômodo causado na visão pelo excesso de luminosidade. A uniformidade se relaciona com a alternância dos níveis de iluminação em um mesmo ambiente (SANTOS, 2006).

Levando esses fatores em consideração, é possível projetar um sistema de iluminação que atenda aos requisitos de conforto visual e de trabalho do ambiente. Para isso, um estudo do local para dimensionamento dos componentes de forma correta é necessário.

4.3.1 COMPONENTES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Dentro das alternativas de iluminação para melhoria de eficiência energética faz-se necessário conhecer os elementos que compõem um sistema de iluminação, sendo que estes são os alvos para conseguir a redução no consumo. Um sistema de iluminação é composto por lâmpadas, luminárias e reatores.

A lâmpada é o dispositivo que irradia luz. Nas últimas décadas diversos avanços na área de iluminação foram alcançados devido a procura por soluções de eficiência energética na área de iluminação, com foco no menor consumo de energia enquanto é mantido o índice de luminosidade. Assim, o mercado dispõe de lâmpadas cada vez mais eficientes (EPE, 2016). A Tabela (4.6) apresenta as características gerais dos diversos tipos de lâmpadas comercializadas e suas aplicações.

Tabela 4.6 - Características gerais dos diversos tipos de lâmpadas. (ARAUJO, 2017)

Tipo de Lâmpada	Vida Média (horas)	Eficiência Luminosa (lm/W)	Aplicação
Incandescente comum	1000	10 - 15	Locais de pouco uso, decoração e alguns aparelhos domésticos
Incandescente halógena	2000	15 - 25	Com boa reprodução de cores, é indicada para vitrines de lojas, iluminação de fachadas, teatros, estúdios de TV
Fluorescente tubular T8	10000 - 20000	39 - 73	Hóteis, escolas, residências, lojas e escritórios, devido a sua economia no consumo
Fluorescente tubular T5	20000	95	
Fluorescente compacta	8000 - 10000	50 - 80	
Vapor de mercúrio	15000	45 - 55	Iluminação pública, industrial, fachada de prédios, monumentos e jardins. Devem ser instaladas em locais com pé direito acima de 4 metros, para evitar ofuscamento
Vapor metálico	6000 - 20000	65 - 90	Lojas de departamento, estádios de futebol, monumentos, indústrias, residências, automóveis
Mista	6000 - 8000	18 - 25	Vias públicas, jardins, praças, estacionamentos e comércio em geral. São substitutas diretas das lâmpadas incandescentes quando não houver outra alternativa. Não devem ser instaladas em locais com pé direito inferior a 4 metros.
Vapor de sódio a baixa pressão	15000	200	Por sua luz ser monocromática, sua aplicação é reduzida a locais como portos, pátios e auto-estradas.
Vapor de sódio a alta pressão	24000	120	Vias públicas, iluminação externa, ferrovias, iluminação interna de indústrias
LED compacta	50000	100	Iluminação geral, focal e dirigida, especialmente em lugares que permaneçam iluminados durante várias horas ao dia, como hotéis e comércios.
LED tubular	30000	80	

As luminárias são objetos responsáveis por modificar a distribuição do fluxo luminoso produzido pela lâmpadas, além de suporte para a mesma. São compostas por um receptáculo destinado a lâmpada, dispositivos que alteram a distribuição da luminosidade, como refletores, refratores e difusores, e outros acessórios de fixação.

Na escolha de luminárias devem ser avaliados critérios que garantam o conforto visual do usuário em conjunto com a máxima eficiência do sistema luminária-lâmpadas, são eles: coeficiente de utilização, eficiência luminosa, capacidade de direcionar o fluxo luminoso e eficácia no controle de ofuscamento.

Visando a eficiência durante o uso das luminárias, devem ser submetidas à manutenções periódicas, garantindo que as superfícies refletoras estejam em boas condições de reflexão, pois a sujeira que se deposita na luminária faz com que a eficiência do conjunto diminua. A Tabela (4.7) apresenta os diferentes tipos de luminárias e suas características gerais.

Tabela 4.7 - Tipos de luminárias (SANTOS et al., 2006)

Tipo de Luminária	Características Gerais
Embutidas	Normalmente usadas com lâmpadas incandescentes comuns
	Apresentam baixo rendimento
	Normalmente apresentam problemas de superaquecimento
	Difícil manutenção
Fechadas (lâmpadas fluorescentes)	Disponíveis com vários tipos de elementos de controle de luz (refletores espelhados com proteção visual, difusor prismático, etc.)
	Rendimento moderado, dependendo do tipo de elemento de controle da luz
	Difícil manutenção
	Fixadas sobre a superfície do teto e, em alguns casos, embutidas
	As que dispõem de refletores sem elementos de controle de luz apresentam melhor rendimento
Abertas	Disponíveis com ou sem elementos de controle de luz
	Apresentam rendimento superior ao da luminária fechada
	Fácil manutenção
	Fixadas sobre a superfície do teto ou suspensas
Spots	Compatíveis com vários tipos de lâmpadas incandescentes refletoras ou coloridas
	Utilizadas para iluminação direcional do fluxo luminoso
	Fácil manutenção
	Fixadas sobre as superfícies ou embutidas
Projetores	Disponíveis em diversos tamanhos
	Bom rendimento luminoso
	Fixadas sobre superfícies ou suspensas
	Compatíveis com lâmpadas incandescentes comuns até lâmpadas a vapor de sódio
	Fácil manutenção, dependendo do local de instalação

Os reatores são equipamentos que atuam limitando a corrente elétrica que passa pela lâmpada e controlando a tensão de partida e funcionamento em lâmpadas de descarga. Reatores com bom rendimento e alto fator de potência são recomendados. A Tabela (4.8) apresenta os tipos de reatores e suas características.

Tabela 4.8 - Tipos de reatores

Tipo de Reator	Características Gerais
Eletromagnético	Apresentam perdas elétricas consideráveis
	Baixo fator de potência
	Carga térmica muito alta
	Podem ser do tipo "partida com pré-aquecimento" ou partida rápida
Eletrônicos	Mais compacto comparado ao eletromagnético
	Frequência de operação entre 20 e 50 kHz
	A frequência de operação pode liberar harmônicos na rede, podendo chegar a uma distorção harmônica total (DHT)
Dimerizáveis	Permitem ajuste do fluxo luminoso entre 0 a 100%
	Possibilita integração entre luz artificial e natural
	Permite uma economia de até 70% da energia consumida quando comparado aos demais tipos de reatores

4.4 ALTERNATIVAS DE CLIMATIZAÇÃO

As alternativas de eficiência energética para climatização serão analisadas separadamente para dois casos: alternativas de equipamentos de *retrofit* em edifícios já existentes; e tecnologias para melhoria de eficiência energética em novos sistemas de climatização.

4.4.1 ALTERNATIVAS DE RETROFIT

Segundo o departamento de energia dos Estados Unidos, *Retrofits* de edifícios para melhoria de eficiência energética podem ser separados em dois grupos: convencional e *retrofit* completo.

A principal diferença entre os dois grupos é que *retrofits* convencionais são realizados de maneira que uma alteração seja feita após a outra, em uma abordagem programada. Já os *retrofits* completos são fruto de uma abordagem de projeto integrada, onde diversos fatores são considerados para que a melhor alternativa seja selecionada, e suas alterações ocorrem simultaneamente (DOE, 2011).

- *Retrofit* Convencional

São uma alternativa com bom custo-benefício e apresentam melhora na eficiência energética do prédio a um baixo risco, principalmente para administrações de edifícios que não dispõem de grande orçamento para atualização de seus edifícios. *Retrofits* convencionais normalmente são programados de forma que uma medida seja realizada após a outra, esse sequenciamento é importante devido ao impacto que um sistema terá em outros, como o impacto da troca de lâmpadas no sistema de ar condicionado, por exemplo. Essas medidas tipicamente são substituições de componentes de equipamentos já

existentes para melhorar a eficiência energética. A economia de energia obtida está na faixa de 25% a 45%, se tornando uma alternativa interessante, já que apresenta baixo investimento inicial. (DOE, 2011)

A Tabela (4.9) apresenta um resumo das medidas de *retrofit* convencional aplicáveis a AVAC de edifícios de maneira geral.

Tabela 4.9 - Alternativas de retrofit convencional aplicáveis a AVAC (Adaptado de DOE, 2011).

Sistema	Nº da Medida	Descrição da Alternativa
AVAC	HA9	Otimizar a rotina de inicialização dos equipamentos de climatização
	HA10	Revisar o controle do amortecedor das tomadas de ar de renovação
	HA11	Aumentar a zona de faixa neutra de temperatura (substituir termostatos pneumáticos)
	HA12	Reduzir o setpoint mínimo das caixas VAV (fazer balanceamento das caixas pneumáticas)
	HW7	Desligar os equipamentos quando não houver carga de resfriamento
	HW8	Aumentar a eficiência do sistema de condensação de água
	HW9	Aumentar a eficiência do sistema de bombeamento de água
	HW12	Adicionar um variador de frequência aos chillers
	HW13	Adicionar um economizador de água gelada
	HW18	Realizar a climatização de salas de servidores com free-cooling e não resfriamento mecânico
	S1	Aumentar a eficiência do sistema de fornecimento de água quente

- *Retrofit* Completo

Um *retrofit* completo é uma oportunidade de redução de consumo energético maior do que os obtidos pelos *retrofits* convencionais, com reduções de até 50% de demanda por energia elétrica. Porém, necessitam de alto investimento inicial e apresentam grandes períodos de *payback*.

Projetos de *retrofit* completos combinam muitas das medidas apresentadas anteriormente em uma abordagem de projeto integrada em todo o edifício. Esses projetos afetam diversas áreas e sistemas do edifício, como a envoltória, iluminação e AVAC, e o *retrofit* de cada sistema deve ser projetado considerando os outros sistemas.

Alguns projetos de *retrofit* completos podem ter valores de investimento inicial tão altos que se torna complicado justificar sua implementação apenas na redução de consumo energético e economia nos custos de manutenção dos equipamentos. Porém, durante a vida útil de um edifício, diversas oportunidades para realizar um *retrofit* completo acontecem, são algumas delas: Atingir uma certificação de eficiência energética, substituição de telhados e janelas, fim da vida útil de equipamentos de grande porte, nova administração, grande alteração ocupacional, entre outros.

A Tabela (4.10) apresenta um resumo das medidas de *retrofit* completo aplicáveis a equipamentos de AVAC em edifícios.

Tabela 4.10 - Medidas de retrofit completo aplicáveis a AVAC (adaptado de DOE, 2011)

Sistema	Nº da Medida	Descrição da Medida
AVAC	HA13	Aumentar a zona de faixa neutra de temperatura, adicionar controle de stand-by em salas de reunião (Fazer upgrade para zonas de controle DDC - Controle digitalizado direto)
	HA14	Reduzir o setpoint mínimo das caixas VAV, resetar a pressão estática nos dutos (fazer upgrade para zonas de controle DDC - Controle digitalizado direto)
	HA15	Adicionar ventilação por demanda
	HA16	Substituir o motor elétrico dos ventiladores por motores com variadores de frequência (VFD)
	HA17	Mudar o tipo de sistema de ar-condicionado
	HW7	Desligar os equipamentos quando não houver carga de resfriamento
	HW8	Aumentar a eficiência do sistema de condensação de água
	HW9	Aumentar a eficiência do sistema de bombeamento de água
	HW11	Substituir os motores de bombas dos equipamentos
	HW12	Adicionar um variador de frequência aos chillers
	HW13	Adicionar um economizador de água gelada
	HW14	Adicionar um sistema de recuperação de calor de água gelada
	HW15	Substituir caldeiras e alterar a tubulação do sistema de aquecimento para fluxo variável
	HW16	Substituir os queimadores da caldeira com queimadores variáveis
	HW18	Resfriar salas de servidores com ventilação forçada ao invés de refrigeração mecânica
	-	Substituir equipamentos tipo rooftop por unidades com maior eficiência energética
	-	Substituir equipamentos tipo rooftop por unidades VAV de alta eficiência
	-	Substituir equipamentos tipo rooftop por unidades que fazem uso de resfriamento evaporativo

4.4.2 TECNOLOGIAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA NOVOS SISTEMAS DE AVAC

Após análise de diversos artigos científicos, particularmente mais recentes, de 2010 em diante, foi feita uma visão geral de novas tecnologias em eficiência energética de sistemas de ar condicionado. Neste trabalho essas tecnologias serão divididas em 3 grupos distintos: tecnologias de dispositivos de resfriamento, integração de projetos e sistemas inovadores e controle e gerenciamento operacional. A Figura (4.4) apresenta os grupos de novas tecnologias e suas ramificações.

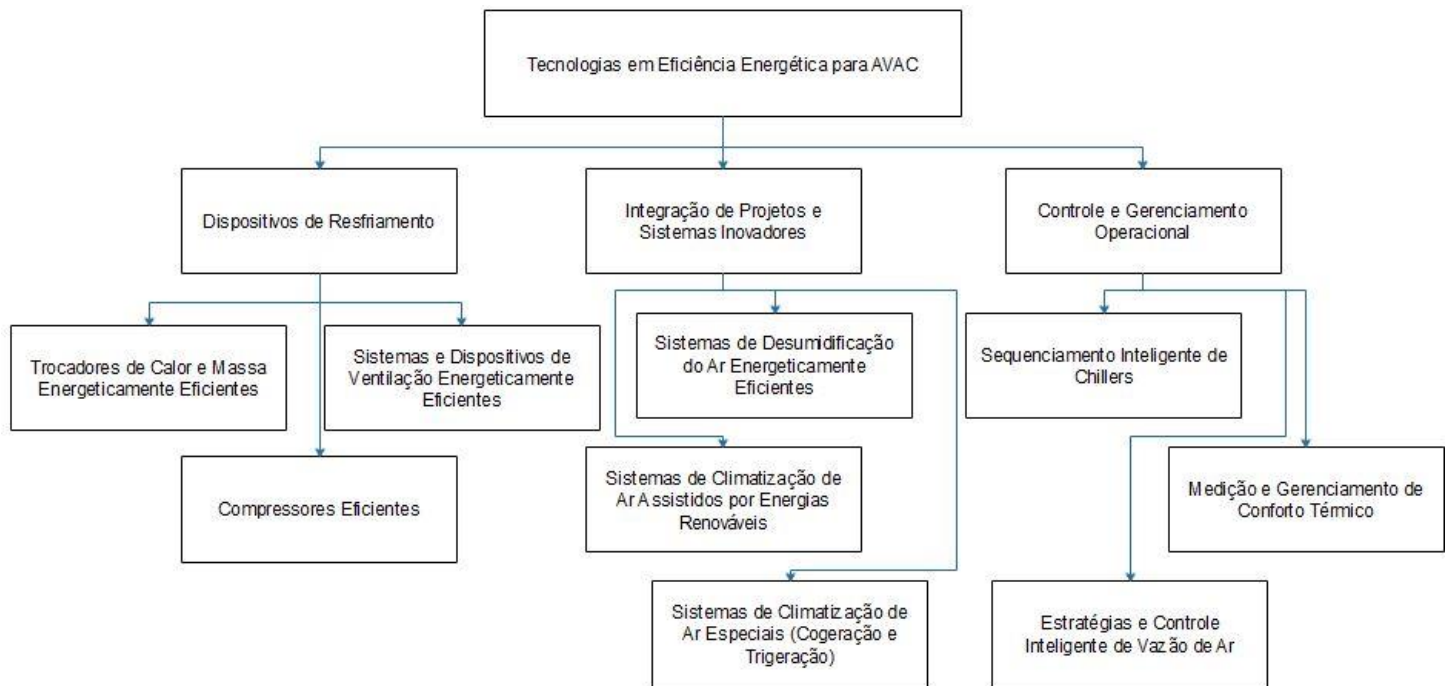


Figura 4.4 - Tecnologias em Eficiência Energética para AVAC

- Trocadores de Calor e Massa Energeticamente Eficientes

A proposta dessa tecnologia segue a onda dos novos fundamentos em teorias de resfriamento evaporativo para desenvolver um evaporador direto/indireto de transferência de calor e massa (HMX) para um resfriamento sensível.

O inventor dessa tecnologia é o Dr. Maisotsenko e a tecnologia é conhecida como tecnologia de resfriamento de ciclo-M. Fundamentalmente, o sistema HMX tem a capacidade de resfriar o ar abaixo da temperatura de bulbo úmido enquanto se aproxima da temperatura de ponto de orvalho (MAISOTSENKO, 2007)

O trabalho do mecanismo do ciclo-M HMX é descrito da seguinte forma (MAISOTSENKO, 2007). Parte da superfície do lado seco é projetada para o ar de trabalho passar, enquanto o resto é alocado para o ar do produto. Ambos, ar do produto e de trabalho, são direcionados para fluir sobre o lado seco ao

longo de canais de fluxo paralelo. Existem vários buracos distribuídos regularmente na área onde o ar de trabalho é retido e cada um deles permite que uma certa porcentagem de ar passe e entre no lado molhado da placa. O ar é gradualmente entregue para o lado molhado enquanto flui ao longo do lado seco, formando uma distribuição uniforme de correntes de ar sobre a superfície molhada. Esse arranjo permite que o ar de trabalho seja pré-resfriado antes de entrar no lado úmido da placa, perdendo calor para a superfície molhada oposta. O ar pré-resfriado, entregue para o lado úmido, flui pela superfície molhada por meio dos canais dispostos paralelamente aos canais do lado seco, absorvendo calor do ar de trabalho e do produto. Devido ao seu efeito de pré-resfriamento, o ar de trabalho no lado molhado tem uma temperatura muito mais baixa e, portanto, é capaz de absorver mais calor de seus dois lados adjacentes. Como resultado, a efetividade do resfriamento da nova estrutura é maior que a do tradicional trocador de fluxo cruzado.

A eficácia do resfriamento e a eficiência energética são partes extremamente dependentes das dimensões das passagens de ar, e menos dependentes da temperatura da água de alimentação. Quantitativamente, é recomendado que a velocidade do ar de entrada do trocador de calor e massa seja regulada entre 0,3 e 0,5m/s, enquanto a altura da passagem de ar (canal) deve ser ajustada para 6mm ou menos (ZHAO, 2008). Longitudinalmente, a passagem deve ter 200 vezes a altura e a relação ar de entrada - ar de trabalho deve ser em torno de 0,4. Adotando estes guias específicos, o ciclo-M HMX pode potencialmente alcançar a eficácia da temperatura de bulbo úmido até 1.3 e a eficácia da temperatura de ponto de orvalho de até 0.9.

Um recente trabalho inovador diz respeito ao desenvolvimento de um trocador de calor com revestimento dessecante (SDC) alimentado por energia solar. Foi desenvolvido um modelo de sistema integrado combinando as fórmulas de diversos componentes (GE, 2012). Resultados demonstraram que o sistema SDC pode fornecer ar para espaço interior com potências de refrigeração de 2,9-5kW.

Um estudo realizado recentemente acerca da integração de materiais de mudança de fase (PCMs) com trocadores de calor a ar para resfriamento de edifícios. Tanto trabalhos experimentais quanto de simulação foram desenvolvidos para este trocador de calor (LAZARO, 2009). Os resultados experimentais demonstraram que o trocador de calor a ar que utiliza PCM com condutividade, tinha menor energia total armazenada, mas quando projetado adequadamente, tem maior poder de resfriamento e pode ser aplicado para free-cooling (LAZARO, 2009). Os resultados simulados mostraram que para ser efetivo na refrigeração do ar, os critérios de seleção do PCM devem incluir a demanda de energia.

- Compressores Eficientes

Para alcançar um baixo kW/TR, deve-se reduzir o consumo de energia dos compressores.

Dependendo da magnitude da capacidade de resfriamento, os tipos de compressor variam entre compressores alternativos (capacidade < 20 TR), compressores do tipo scroll (capacidade < 10 TR), compressores de parafuso (30 TR < capacidade < 200 TR) e compressores centrífugos ou roto-dinâmicos com capacidades até 3000 TR.

Nos últimos anos, pode-se considerar a invenção do compressor scroll um grande avanço tecnológico (QUOILIN, 2010), sendo aproximadamente 10% mais eficiente do que o compressor alternativo padrão.

Wang et al. estudou a performance de um sistema de bomba de calor R410A de 11kW com um compressor do tipo scroll de duas fases com injeção de vapor. Eles observaram um ganho de 14% em capacidade de resfriamento na temperatura ambiente de 46°C e cerca de 30% de melhoria na capacidade de aquecimento com 20% de ganho do COP, quando comparado ao sistema convencional que tem o mesmo volume de deslocamento do compressor (WANG, 2009).

Um novo estudo analisou um compressor chamado de *bowtie*, devido a duas câmaras de compressão opostas formando uma gravata borboleta. O compressor *bowtie* modula a capacidade de resfriamento regulando o curso do pistão sem afetar o volume de folga. O impacto imediato é uma melhor eficiência termodinâmica (KIM, 2007).

O compressor *bowtie* possui várias características únicas: a capacidade de refrigeração pode ser controlada de forma barata usando uma simples válvula solenóide on-off; sob operação padrão, o compressor começa com um curso de pistão mais curto, resultando em uma partida suave; a eficiência geral do compressor é melhorada mantendo um volume de folga constante em todos os momentos; e a capacidade de modulação é realizada substituindo a simples válvula solenoide por uma válvula de controle mais complexa, levando ao aprimoramento da eficiência do compressor (KIM, 2007).

Um grupo de pesquisa desenvolveu um novo compressor de resfriamento chamado 'Revolving Vane (RV) compressor'. Seu design inovador envolveu o uso de um cilindro giratório que se movia junto com o mecanismo de compressão para reduzir a perda de energia (TEH, 2009). Consequentemente, a fricção e as perdas por vazamento foram efetivamente reduzidas. Comparado ao compressor alternativo, a perda de fuga na folga radial no compressor RV foi projetada para ser 40% menor do que a do primeiro com eficiência volumétrica antecipada chegando a 95%. Dados dos experimentos mostraram uma redução de energia de 80% quando comparado aos sistemas atuais no mercado (TEH, 2009).

Uma abordagem menos atrativa para melhorar o desempenho do compressor é encher o compressor com uma quantidade substancial de óleo. Bell et al (2011) demonstrou a possibilidade de melhorar a eficiência do ciclo inundando o compressor com uma grande quantidade de óleo para conseguir um processo de compressão quase-isotérmico. A inundação do compressor pode induzir um aumento acentuado na eficiência do sistema sobre a compressão de vapor de um sistema padrão (BELL, 2011).

- Sistemas e Dispositivos de Ventilação Energeticamente Eficientes

A ventilação é um contribuinte importante do uso de energia principalmente em espaços de alta ocupação. Considerando isso, existe uma necessidade aparente de conceber estratégias de ventilação para os AVACs que melhoram de forma holística a eficiência energética, atendendo aos padrões de melhor ventilação, bem como garantindo uma boa qualidade do ar interior.

Uma série de estudos investigaram a relação entre taxas de ventilação e a saúde dos ocupantes do edifício (sintomas da síndrome do edifício doente, doenças respiratórias), as taxas de ausência e a qualidade do ar (SEPPANEN, 1999), (APTE, 2002).

A maioria desses estudos encontraram uma piora na saúde, ou perceberam que os melhores resultados sobre a qualidade do ar são devido a maiores níveis de ventilação ou menor concentração de CO₂. O resultado deste estudo indicou que as taxas de ventilação têm efeitos importantes sobre as pessoas (SEPPANEN, 1999), (WARGOCKI, 2002).

O design da ventilação não deve ser projetado apenas para ser eficiente energeticamente, mas também para minimizar possíveis doenças transmitidas pelo ar.

Um trabalho recente mostrou que é possível projetar sistemas AVAC conciliando a eficiência energética e uma melhora na qualidade do ar. O método define uma estratégia de controle para a gestão da qualidade do ar associada com as taxas de ar de renovação (GINESTET, 2010).

Zhang et al. (2011) fez um estudo comparativo entre diferentes métodos de ventilação e seu impacto na performance energética anual. Os métodos de ventilação que foram estudados incluem ventilação de extração, ventilação de ar de mistura e ventilação de deslocamento. Resultados comparativos indicaram que a ventilação de extração quando comparada a ventilação de ar de mistura, tem melhor economia de energia em três pontos: redução nas cargas de ventilação e transmissão e aumento de COP dos chillers. Qualitativamente, a economia anual pode ser substancial; produzindo mais de 25% a 44% de melhora quando comparada a ventilação de deslocamento e a ventilação de ar de mistura, respectivamente (LIN, 2011).

Quando considerados os fatores juntos – os efeitos importantes da ventilação para as pessoas, a energia usada para ventilação e a evidências da deficiência da ventilação em edifícios em geral, é muito claro que precisamos desenvolver e promover o uso de sistemas altamente eficientes energeticamente para fornecer a ventilação de edifícios.

- Sistemas de Desumidificação do Ar Energeticamente Eficientes

Em vários países tropicais, umidades relativas externas de até 85% são relativamente comuns. Em climas quentes e úmidos, equipamentos de ar condicionado convencionais lidam com cargas sensíveis e latentes do ambiente resfriado. Por outro lado, resfriamento e desumidificação do ar são necessários para garantir conforto térmico para humanos. Normalmente, a remoção da carga de calor latente e sensível é realizada permitindo que o ar úmido flua sobre uma serpentina evaporadora cuja superfície é mantida abaixo da temperatura do ponto de condensação do ar úmido. O ar é resfriado e desumidificado.

Se a remoção da umidade do ar puder ser manipulada por outros meios além da condensação, por exemplo por uso de dessecante, a energia de resfriamento pode ser reduzida.

Em uma tentativa de melhorar a desumidificação do ar, foi proposta uma investigação teórica experimental sobre um fluxo radial contínuo dessecante e desumidificante, na qual partículas esféricas de sílica gel foram usadas como dessecante no desumidificador (AWAD, 2008).

Atualmente, a desumidificação líquido-dessecante provou ser um método efetivo para extrair a umidade do ar com menor consumo de energia. Por exemplo, um sistema de ar condicionado híbrido que integra cloreto de lítio líquido para a desumidificação do ar demonstrou melhora acentuada no COP de até 20% e 100%, nas condições de verão e inverno respectivamente (ZHANG, 2010).

Outra proposta procura incorporar a base de uma membrana trocadora de calor total em um sistema de desumidificação mecânica. Um modelo termodinâmico foi formulado para investigar a performance do sistema combinado. Simulações de hora em hora revelaram que o sistema da proposta independente de desumidificação do ar poderia economizar 33% da energia primária (ZHANG, 2005).

Demonstrando o valor de usar um sistema exclusivo de desumidificação do ar, Bergero and Chiari propuseram um sistema desumidificador trabalhando com uma membrana de solução higroscópica e hidrofóbica. O ar fornecido é simultaneamente refrigerado e desumidificado em contato com a membrana possibilitando que o dispositivo de resfriamento opere a uma temperatura significativamente maior, a economia de energia pode exceder 60%, principalmente quando a carga latente é significativa (BERGERO e CHIARI, 2011).

Finalmente, os recentes avanços na tecnologia de desumidificação podem levar ao desenvolvimento inovador da próxima geração de ar condicionados de alta eficiência energética. Um sistema de ar

condicionado acionado termicamente, que combine tecnologias de desumidificação dissecante rotativa e resfriamento evaporativo foi proposto e investigado. Em adição à desumidificação, o sistema é capaz de produzir água gelada, assim realizando separadamente o controle da temperatura e da umidade sem aumentar o consumo de energia elétrica (LA, 2010).

- Sistemas de Climatização de Ar Assistidos por Energia Renovável

Tecnologias de resfriamento assistida por energia renovável usam energia térmica solar para acionar termicamente os equipamentos de climatização.

Tipicamente, o consumo de energia para ar condicionado em edifícios aumenta a medida que o ganho de calor proveniente de radiação solar cresce. Portanto a combinação térmica solar e resfriamento é mais favorável para alcançar um baixo kW/TR.

Resfriamento assistido por energia solar emprega chillers acionados pela temperatura solar, o qual assiste sistemas de resfriamento por compressão elétrica. Chillers acionados por temperatura geralmente se referem a tecnologias de absorção e adsorção.

Maquinas de resfriamento movidas termicamente, tanto chillers de absorção ou adsorção, foram usados por décadas, mas foram alimentados principalmente pelo lixo industrial ou pelo calor distrital. Uma pesquisa recente se dedicou a estudar o potencial uso de energia solar para aciona-los. Vantagens: O chiller é acionado utilizando energia renovável (água quente gerada pela energia solar) fazendo todo o processo de resfriamento ser neutro em CO₂; reduz o consumo de energia com chillers com compressão a vapor, reduzindo os custos de picos por demanda; apoia a operação do chiller com condensação a ar operando sob clima extremamente quente, pois como se sabe, a eficiência do chiller diminui drasticamente com altas temperaturas ambientes (NUNEZ, 2010).

Zhai et al. (2011) recentemente revisou algumas novas opções de projetos que dizem respeito a coletores solares, sistemas de energia auxiliares e novos modelos de resfriamento (ZHAI, 2011).

Tecnologias de absorção tem ganhado popularidade devido ao uso da água como fluido de trabalho ecológico que tem o potencial de destruição de ozônio igual a zero.

Um estudo comparativo recente foi conduzido por Fong et al. (2010) para investigar a performance de cinco tipos de sistemas de resfriamento solar, sendo eles, refrigeração elétrica por compressão solar, refrigeração mecânica por compressão solar, refrigeração por absorção solar e resfriamento solar com dissecante. Eles desenvolveram modelos de simulação baseados em componentes para avaliar a performance de cada um desses sistemas ao longo da radiação solar anual em um clima subtropical como o de Hong Kong.

Os resultados indicaram que ambas, refrigeração solar por compressão e refrigeração solar por absorção renderam o maior potencial de economia de energia. Esses dois sistemas de resfriamento podem ter desempenho ainda melhor se coletores solares avançados fossem integrados (FONG, 2010).

Outro artigo revisou, comparou e resumiu o desempenho de cinco sistemas de chillers de absorção e adsorção. Eles sugeriram que sistemas de resfriamento por absorção solar são adequados para sistemas de ar condicionado em edifícios grandes. Comparativamente, os sistemas de resfriamento solar por absorção são promissores para edifícios menores tendo menos carga de resfriamento. Eles recomendaram projetar sistemas de energia integrados ativados por energia solar em edifícios públicos (ZHAI, 2009).

- District Cooling System (DCS)

Um DCS distribui água gelada de uma fonte central para diversos edifícios por uma rede de canos. Os chillers utilizados para condicionar a água gelada e as torres de resfriamento são localizadas em uma área central da planta. Esse layout elimina a necessidade de sistemas separados em edifícios individuais.

As vantagens incluem melhor conforto, confiabilidade aprimorada e melhor conveniência. As vantagens econômicas que podem ser obtidas são menores custos iniciais devido a economia com a compra de chillers, menor custo de manutenção anual e redução do custo operacional resultante do menor consumo de energia. Outras vantagens incluem melhor qualidade de resfriamento, economia de espaço, diminuição da poluição solar, e ser ecologicamente correto. DCS precisam atender às necessidades adicionais de bombeamento e a previsão de menores temperaturas de suprimento de água gelada para suprir maiores perdas de carga na tubulação.

Outro estudo interessante tem sido conduzido incorporando um sistema de estoque de gelo com DS. A grande característica desse sistema é que parte da demanda de refrigeração é deslocada dos horários de pico para os outros horários. Essa mudança traz benefícios mútuos tanto para fornecedores de energia quanto para consumidores (CHAN, 2006).

Apesar do sucesso da maioria dos projetos de district cooling pelo mundo, é possível aprimorá-los para obter melhor eficiência energética. No entanto, devido ao substancial investimento de capital envolvido para o DCS, sua implementação deve ser avaliada de modo que seja bem planejado, otimizado, para que os sistemas possam ser projetados e implementados.

- Cogeração e Trigerção

Uma das aplicações mais eficientes de tecnologias de cogeração e trigerção ocorrem em regiões onde há abundância de calor e o resfriamento é necessário. Chillers a absorção e adsorção encaixam-se em qualquer aplicação de refrigeração onde cogeração ou trigerção são necessárias. Com a

disponibilidade de calor livre, como é comum em muitos sistemas de cogeração/trigeração, a energia potencial economizada pela escolha de um chiller termal ao invés de um mecânico pode ser muito significativa (FUMO, 2010).

Em um estudo, um chiller de absorção movido por uma microturbina de brometo de lítio foi projetado e estudado experimentalmente para fornecer energia elétrica e climatização para um espaço de laboratório. Os resultados dos testes mostraram que esse sistema de cogeração é capaz de produzir uma eficiência total do sistema de 40% a 49% (HO, 2004).

Um sistema avançado de trigeração, composto por uma microturbina a gás no qual os gases de escape aquecem o óleo para permitir a refrigeração com um chiller de absorção de água quente para aquecimento, foi estudado experimentalmente. A configuração técnica do sistema inclui uma microturbina a gás com uma rede de energia de 28 kW, que produz cerca de 60kW de calor para acionar um chiller de absorção resfriado a ar por amônia e água com uma capacidade de 17 kW. A capacidade do chiller e o COP do chiller de absorção influenciaram indiretamente na temperatura ambiente da turbina a gás e afetou diretamente na condensação e na absorção do chiller (MOYA, 2011).

- Estratégias de Controle Inteligente de Vazão de Ar

Um estudo recente nos EUA envolvendo a análise ambiental mostrou que melhorar os ambientes de construção pode melhorar os benefícios de saúde para mais de 15 milhões de trabalhadores nos EUA.

Existem esforços voltados a estudar um fluxo de ar inteligente e estratégias de controle que não só empregam melhor a qualidade do ar interior, mas também garantem edifícios sustentáveis reduzindo o consumo de energia para ar condicionado.

Uma estratégia de ventilação controlada por demanda adaptativa baseada em concentração de CO₂ (DCV), foi estudada quando aplicada em edifícios construídos em Hong Kong. A estratégia adaptativa do DCV envolve uma equação de ventilação dinâmica multi-zona para determinar o fluxo de ar necessário para um sistema de ar condicionado multi-zona. Resultados mostraram que a estratégia DCV podem reduzir significativamente o consumo de energia elétrica durante o verão em Hong Kong (SUN, 2011).

Tao et al. (2011) projetaram e desenvolveram um novo e dinâmico controle agendado por hora baseado em CO₂ para edifícios. A essência de sua estratégia envolve escalas criteriosamente planejadas por uma taxa de ventilação base para períodos no qual o edifício está ocupado e calculando a taxa de ventilação dinâmica em cada período ocupado. Isto é, realizando e resolvendo a equação do balanço de massa de CO₂ para manter o CO₂ interno perto do ponto de referência daquele período. Edifícios comuns obtiveram cerca de 26% de economia de energia (LU, 2011).

Outro conceito interessante de conservação de energia envolve a combinação de um sistema de ar condicionado baseado em água gelada com volume de ar variável (VAV) com um sistema de armazenamento de energia térmica (TES). Sob os modos operacionais DCV, o sistema é capaz de atingir 28% de economia de energia por dia, quando comparados a um sistema convencional de ar condicionado de água gelada (PARAMESHWARAN, 2010).

- Medição e Gerenciamento de Conforto Térmico

Sensores medem o ambiente controlado e fornecem um controlador com informações sobre a mudança de parâmetros de conforto de uma maneira precisa e repetível. As variáveis comuns de HVAC são temperatura, pressão, vazão e umidade relativa.

Existe uma necessidade aparente para desenvolver novas estratégias de controle, incorporando sensores inteligentes e atuadores, para manter uma boa qualidade do ar interior e conforto térmico enquanto minimiza o uso de energia. Essas estratégias poderiam usar dados de sensores que variam de CO₂ (e outros sensores de poluentes), à velocidade do ar, temperatura ambiente, nível de ocupação, etc.

Freire et al. (2008) focou na sensação de conforto térmico em edifícios usando controles preditivos para promover economia de energia. A sensação de conforto térmico dos ocupantes foi primeiramente calibrada usando o índice de conforto conhecido como PMV e por uma zona de conforto definida em uma carta psicométrica. Estratégias com algoritmos de controle definidos foram propostas usando um sistema de um atuador único associado a um sistema de refrigeração e/ou aquecimento. O primeiro conjunto de estratégias busca otimizar o conforto térmico e o segundo minimizar o consumo de energia enquanto o conforto térmico é mantido em um nível adequado. De acordo com os resultados, a implementação desses algoritmos de controle, podem ao mesmo tempo manter o conforto térmico e reduzir o consumo de energia (FREIRE, 2008).

Outro trabalho compara diferentes estratégias de controle térmico e seus impactos no custo energético em edifícios. Um novo controlador PID-fuzzy foi comparado com um controlador clássico ON-OFF. A performance dos dois controladores foi quantificada e comparada por meio de duas funções de custo. Resultados indicaram que para um tamanho correto do equipamento, o controlador PID-fuzzy parece levar menos custos de gestão do equipamento (CALVINO, 2010).

Sensores desenvolvidos para controle do resfriamento da água tem papel chave na economia de energia e no controle do conforto térmico em edifícios (LU, 2005). Esses sensores são empregados para regular a velocidade das bombas de resfriamento da água. Diferentes sensores de pressão são tipicamente usados para medir e regular as bombas através de variadores de frequência (JAYAMAHA, 2006).

Isso permite aos manipuladores de ar do edifício atingir uma melhor desumidificação do ar do que outros sistemas, como o sistema de fluxo contínuo de variação de temperatura. Além disso, melhor economia de energia pode ser atingida enquanto o conforto térmico pode ser melhor controlado.

- Sequenciamento Inteligente de Chillers

Empregando uma estratégia de sequenciamento de chillers pode-se atingir uma maior eficiência energética geral dos sistemas de climatização. Por exemplo, um chiller centrífugo é mais eficiente operando em carga cheia ou quase cheia, enquanto o chiller do tipo parafuso normalmente tem maior eficiência em carga parcial. Quando são operados múltiplos chillers, é uma prática prudente carregar o chiller que tem melhor eficiência baseado na demanda de resfriamento atual antes de carregar os outros chillers, que usam mais energia. Quando acionado um segundo ou subsequente chiller, considere as características dos outros chillers, operando os chillers centrífugos em plena carga e balanceando com um chiller de parafuso, se disponível (YU, 2005).

O problema do manejo eficiente do sistema de múltiplos chillers é um dos mais desafiadores. Portanto, espera-se que esteja envolvida uma maior complexidade ao gerenciar sistemas de múltiplos chillers, particularmente em maneiras eficientes energeticamente. O consumo de energia elétrica de um edifício pode aumentar significativamente se os chillers não forem gerenciados adequadamente ou sequenciados de maneira ótima (YU, 2012).

Beghi (2011), recentemente propôs um método unificado para otimização do gerenciamento de vários chillers. A metodologia envolve um balanceamento ideal da carga de climatização do chillers e do sequenciamento dos chillers, mantendo como objetivo principal reduzir o consumo de energia e os custos operacionais. Essencialmente a abordagem é baseada em um algoritmo de estimativa de carga de resfriamento e o processo de otimização é realizado através de um algoritmo de sistema multifásico. O resultado desse trabalho ressaltou que é possível alcançar uma economia de energia substancial enquanto se garante boa satisfação da demanda de resfriamento (BEGHI, 2011).

Um trabalho recente focou em melhorar o manejo de energia dos sistemas de resfriamento utilizando análises multivariadas. O sistema de climatização investigado consiste em cinco conjuntos de chillers, bombas e resfriadores de água para gerar o condicionamento de ar para um prédio comercial (YU, 2012).

Utilizando um grande conjunto de dados operacionais, uma regressão linear múltipla foi realizada para correlacionar o coeficiente de performance do sistema (COP) com um conjunto de variáveis climáticas e operacionais. A análise dos dados é conduzida para calcular a eficiência térmica local e global do sistema. Essas eficiências também são examinadas para determinar qual das variáveis controláveis é responsável por diminuir o COP do sistema. O resultado recorrente do uso do método mostra que a gestão da energia existente é capaz de fornecer uma eficiência térmica de 0,76. O ajuste

fino das variáveis controláveis produz economia de energia de até 5,34% em relação à operação existente (YU, 2012).

Combinar redes neurais artificiais e algoritmos genéticos é provavelmente a mais nova abordagem em relação a otimização operacional de chillers (MA, 2011). Sua implementação levou a economia de energia de até 2% durante os dias mais quentes do verão e até 13% durante o período de temperaturas médias mais baixas (CONGRADAC, 2012).

4.5 ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Como explicitado anteriormente, o conceito nZEB implica que em um período de um ano o consumo energético de um edifício seja igual ou menor do que a energia elétrica gerada por fontes renováveis. Essas tecnologias de geração de energia renovável são divididas em dois grupos: *on-site* e *off-site*. Quando a energia elétrica é gerada dentro das limitações geométricas do edifício, é chamada de geração *on-site*. Se a energia elétrica consumida pelo edifício for proveniente de fontes renováveis, mas que não estão dentro das limitações do edifício, é chamada de geração *off-site*.

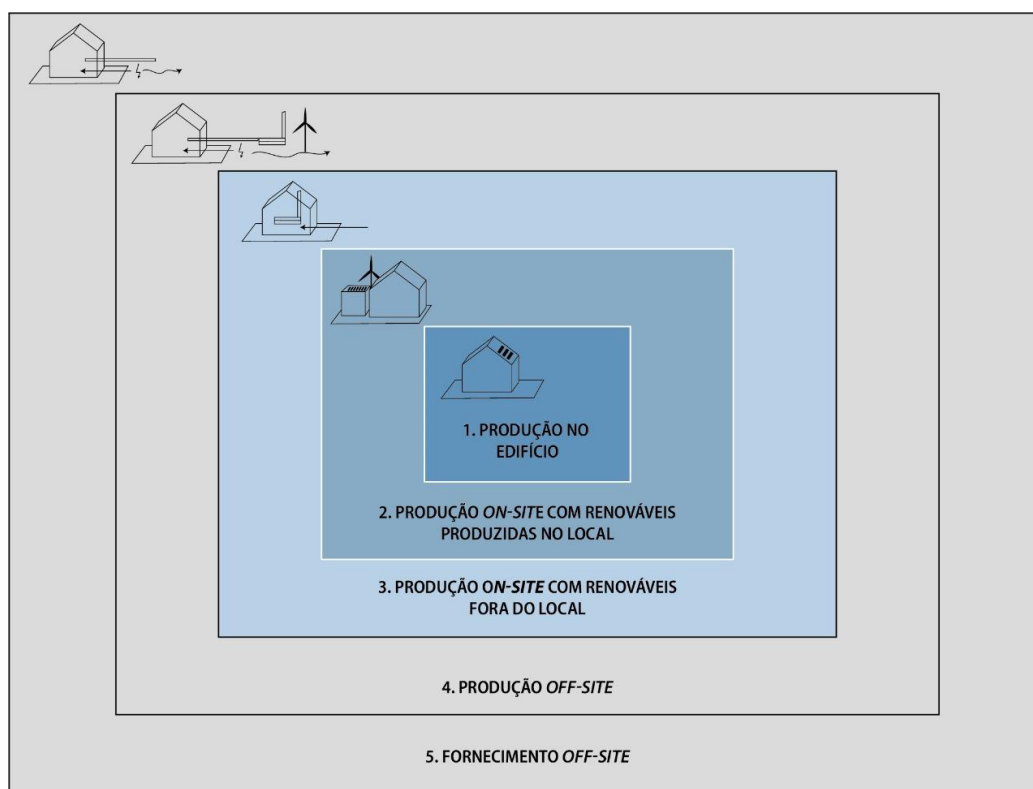


Figura 4.5 - Fonte de Produção de Energia para um nZEB

As Tabelas (4.11) e (4.12) apresentam os diferentes tipos de alternativas de geração de energia elétrica *on-site* e *off-site*, bem como uma rápida descrição de cada alternativa. (EUA, 2014).

Tabela 4.11 - Alternativas de geração de energia elétrica on-site

Tipo de Geração	Fonte de Energia	Tipo de Equipamento	Descrição
On-Site	Eólica	Turbina eólica de pequena escala	Energia eólica, capturada <i>on-site</i> utilizando turbinas eólicas de pequena escala podem ser muito eficazes em locais com bastante incidência de ventos. Ao contrário grandes fazendas eólicas, que produzem até 3MW de energia, as turbinas eólicas de pequena escala são apropriadas para uso urbano.
	Solar	Células Fotovoltaicas	Sistemas fotovoltaicos fazem uma conversão direta de incidência solar em eletricidade utilizando células solares. São capazes de gerar energia mesmo na ausência de raios solares. A quantidade de energia que produzem depende de alguns fatores, como qualidade da incidência solar, a localização da instalação do equipamento, a angulação da célula em relação aos raios solares, entre outros. Os sistemas fotovoltaicos são instalados geralmente em coberturas de edifícios, mas podem também ser instalados postes de iluminação de estacionamentos, paradas de ônibus, etc.
		Aquecimento Solar de Água	Aquecimento solar de água é uma tecnologia que utiliza os raios solares para aquecer água em um reservatório de água quente, que então é distribuído pelo edifício. Essa alternativa diminui a necessidade de uso de caldeiras para aquecimento de água, que fazem uso de fontes não-renováveis para geração de energia.
		Climatização Solar de Ambientes	Com essa tecnologia é possível promover aquecimento de ambientes em edifícios, através da captação de calor da incidência dos raios solares utilizando um fluido refrigerante como meio de transferência desse calor. Esse fluido é então distribuído pelo prédio. O calor proveniente de um coletor solar pode ser usado também para resfriar um edifício, através de um ciclo de refrigeração por absorção.
	Geotérmica		Sistemas geotérmicos capturam o calor natural da terra para ser usado na geração de eletricidade. Em aplicações diretas, vapor proveniente de camadas abaixo da superfície da terra pode mover turbinas, gerando eletricidade. Outro tipo de tecnologia utiliza bombas de calor para capturar o calor natural da terra para aquecer fluidos, que são bombeados para os edifícios, sendo usados como sistema de aquecimento central.

Tabela 4.12 - Alternativas de geração de energia elétrica off-site

Tipo de Geração	Fonte de Energia	Tipo de Equipamento	Descrição
Off-Site	Eólica	Fazenda Eólica	Aquisição de energia elétrica proveniente de fazendas eólicas, com menor impacto ambiental possível.
		Turbina Eólica Privativa	Turbina eólica para geração de energia elétrica para o edifício, porém ela é instalada fora dos limites do prédio, devido a grande área ocupada por uma turbina.
	Biomassa		Turbinas a vapor para geração de energia elétrica podem ser abastecidas com biomassa, como plantas, madeiras, rejeitos agropecuários, esgotos, estrume, etc. Evitando assim o desperdício desses materiais. Ao se aquecer a biomassa em um ambiente sem oxigênio, ela se transforma em uma mistura de combustível líquido e gasoso. Esse processo aumenta a eficiência em até duas vezes, reduzindo emissões de gases de efeito estufa.
	Biogás		Equipar locais como aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto para utilizar o biogás produzido naturalmente. O biogás contém metano, que pode ser convertido em energia elétrica através da queima. Além de ser usado para geração de energia, o uso do metano é uma forma de diminuir seu efeito como gás de efeito estufa, já que o metano possui um GWP 21 vezes maior que o dióxido de carbono.
	Hidrelétrica	Usina hidrelétrica de baixo impacto	Hidrelétricas convertem a energia cinética da água em energia elétrica. Apesar de ser considerada uma fonte renovável, projetos de hidrelétricas podem ter altos impactos ambientais. O instituto de hidrelétricas de baixo impacto (LIHI) certifica projetos que causem o menor impacto ambiental possível. Alguns exemplos de baixo impacto são turbinas hidrelétricas posicionadas em aquedutos, ou em canais de irrigação.
	Células de Combustível		Células de combustível geram energia elétrica através da combinação de oxigênio e hidrogênio, sem a necessidade de combustão, o que reduz os gases de efeito estufa. Porém, uma alimentação contínua de hidrogênio é necessária, portanto, só pode ser considerada uma energia renovável se for utilizada uma fonte renovável de hidrogênio, como gases resultantes de digestores.
	Renovável	Aquisição	Aquisição de energia elétrica proveniente de fontes 100% renováveis, certificadas por órgãos competentes

5. METODOLOGIA PARA ATINGIR nZEB

Neste capítulo é apresentada uma metodologia para se atingir o nZEB em edifícios comerciais e com grande número de pavimentos, climatizados artificialmente,, bem como todas as etapas de decisão.

5.1 VISÃO GERAL DO MÉTODO

Segundo (SARTORI, 2012), para um edifício ser considerado nZEB, a equação (7) deve ser satisfeita, com uma leve alteração para que o conceito de nZEB (*Nearly Zero Energy Building*) seja atingido,

$$\text{CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA} - \text{GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL} \rightarrow 0 \quad (7)$$

ou seja, deve-se reduzir ao máximo o consumo de energia elétrica através de tecnologias energeticamente eficientes que contribuam no aumento da eficiência energética do edifício. Após reduzir ao máximo o consumo de energia elétrica, deve-se adotar um sistema de geração de energia elétrica através de fontes renováveis, como forma de complementar o restante do consumo de energia do edifício.

Pensando em formular uma metodologia para que edifícios comerciais, altos, com grande número de pavimentos e climatizados artificialmente possam se tornar um nZEB, devemos focar então na redução de consumo energético do edifício e no aumento da eficiência energética, além de averiguar quais as alternativas de geração de energias renováveis *on-site* ou *off-site* são aplicáveis para esse tipo de edifício.

Pensando dessa maneira, a metodologia será dividida em quatro etapas, sendo elas: estudo e análise da situação atual do edifício em estudo, propostas de melhoria da eficiência energética do edifício, implementação de sistema de geração de energia elétrica renovável e finalmente análise de viabilidade econômica do projeto.

O fluxograma da metodologia é apresentado na Fig. (5.1).

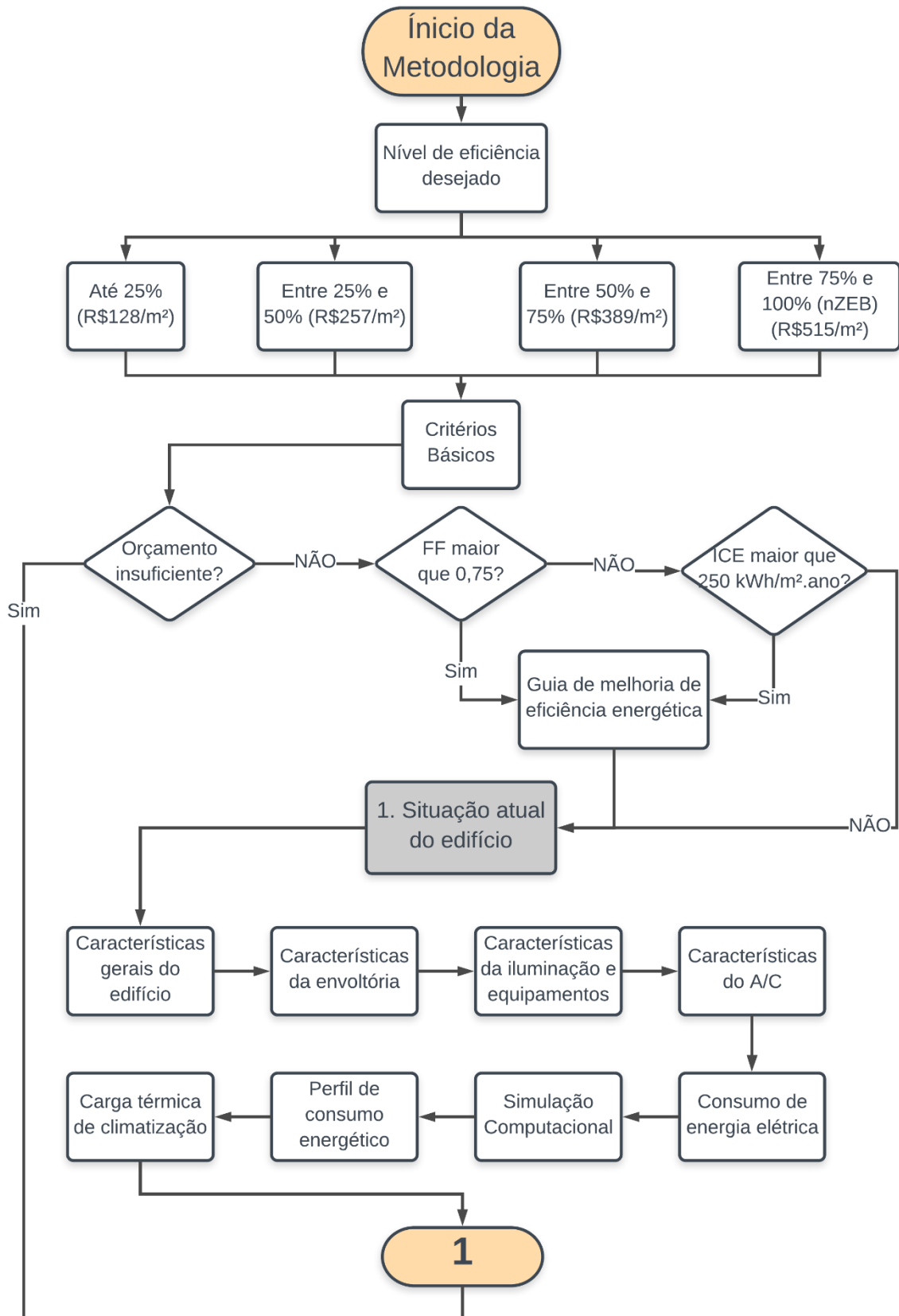
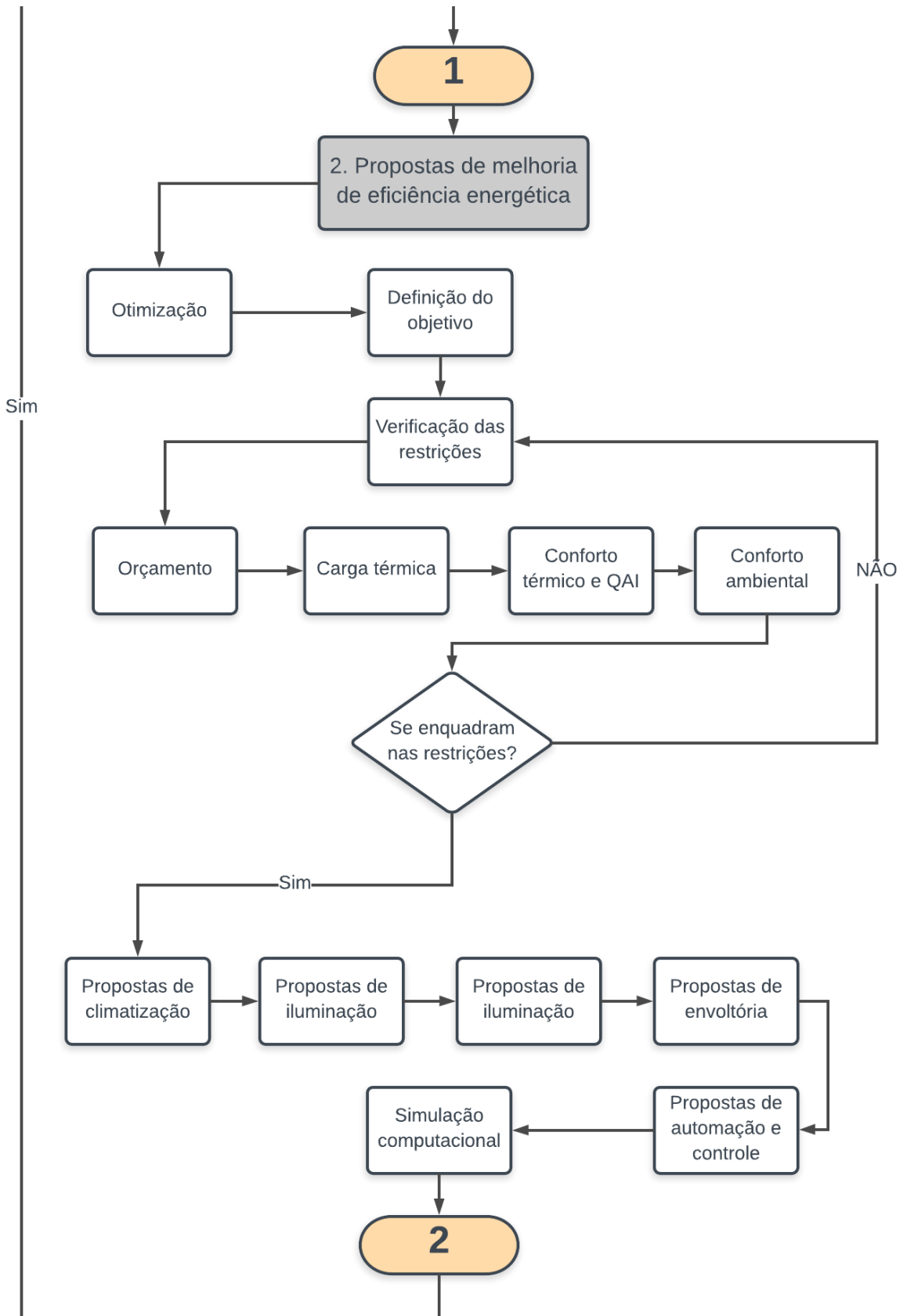
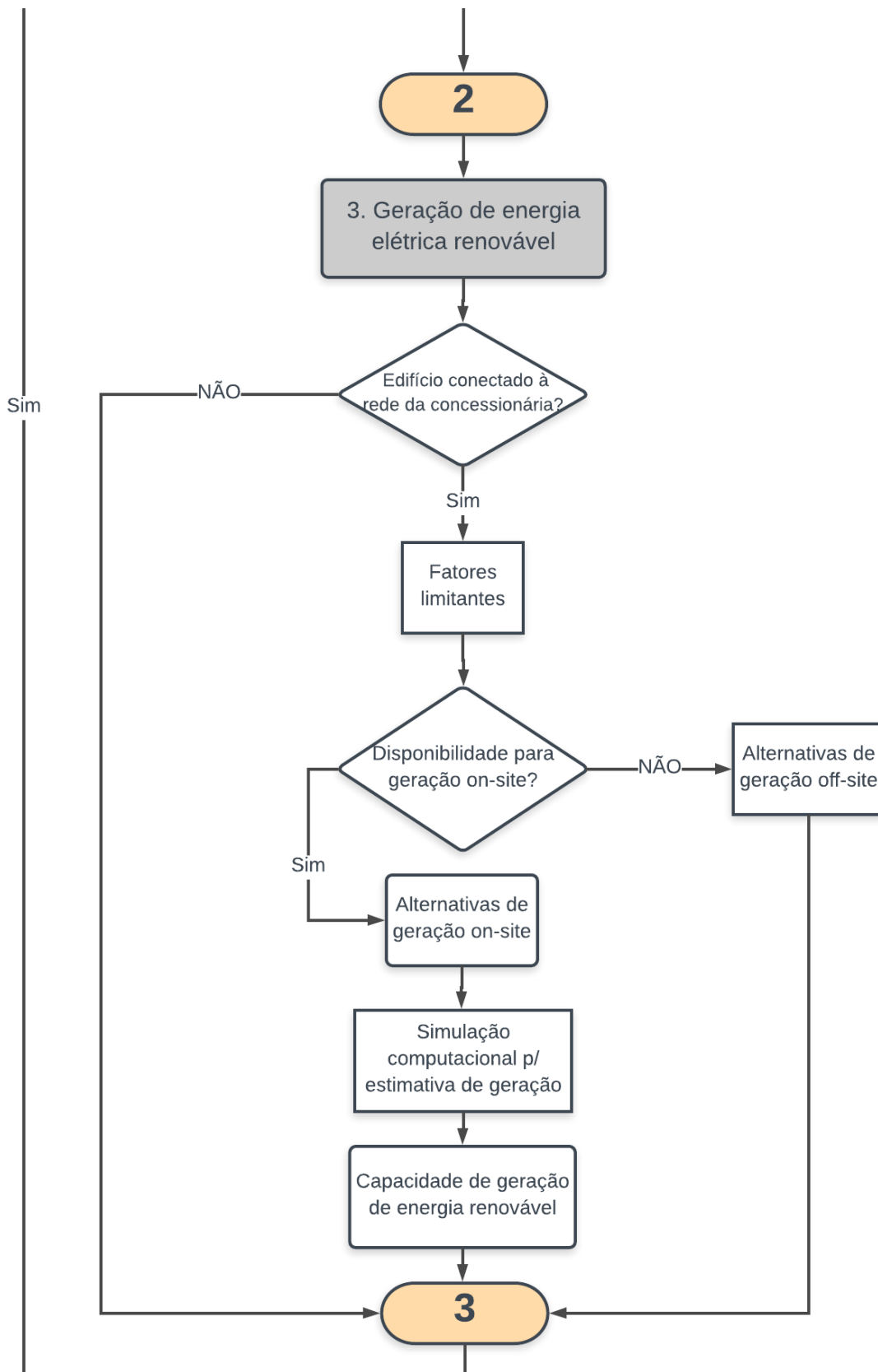
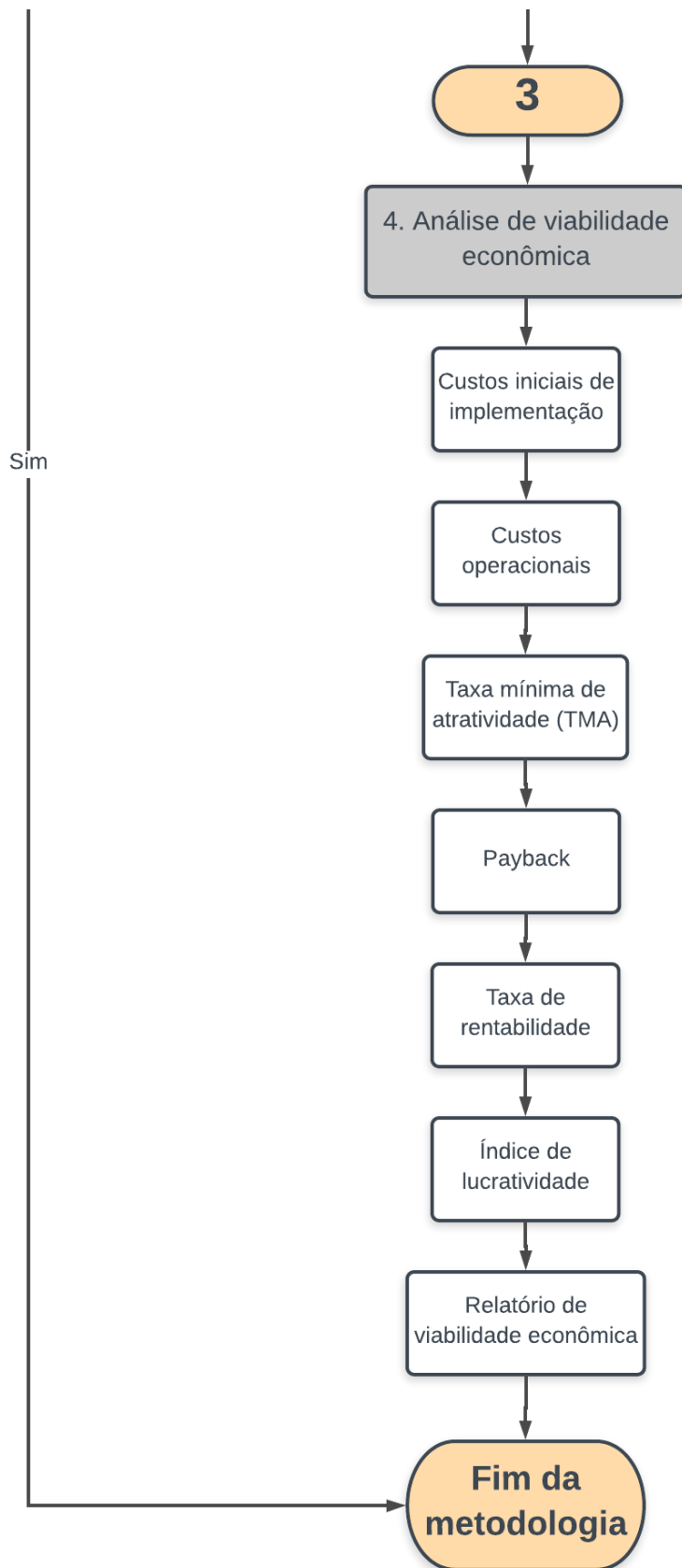


Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia







5.2 NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA A SER ATINGIDO

A primeira definição a ser feita é a seleção do nível de eficiência energética que deseja-se alcançar com a metodologia. Além de já ser possível estimar quais níveis de intervenção podem ser implementados no edifício ao longo da metodologia, sua definição tem impacto direto no orçamento mínimo que deve estar disponível para que certo nível de eficiência energética seja atingido. São 4 níveis que podem ser atingidos:

- I. Eficiência energética de até 25%: Selecionando essa opção, uma melhoria de 25% na eficiência energética do edifício é desejada. Essa escolha é a que necessita do menor valor de orçamento disponível, bem como fará uso de alternativas de *retrofit* mais simples e de menor custo de implantação. Para que essa alternativa seja viável, um orçamento mínimo de R\$128/m² do edifício é exigido;
- II. Eficiência energética entre 25% e 50%: Selecionando essa opção, uma melhoria de 50% na eficiência energética do edifício é desejada. Essa escolha necessita de um valor intermediário de orçamento disponível, pois fará uso de alternativas de *retrofit* mais tecnológicas para atingir os 50% desejados. Para que essa alternativa seja viável, um orçamento mínimo de R\$257/m² do edifício é exigido;
- III. Eficiência energética entre 50% e 75%: Selecionando essa opção, uma melhoria de 75% na eficiência energética do edifício é desejada. Essa escolha já necessita de um alto valor de orçamento disponível para implantação de alternativas de *retrofit* altamente tecnológicos para que os 75% de redução no consumo energético sejam atingidos. Para que essa alternativa seja viável, um orçamento mínimo de R\$389/m² do edifício é exigido;
- IV. Eficiência energética entre 75% e 100% (nZEB): Selecionando essa opção, deseja-se transformar o edifício em um nZEB. Essa escolha demanda o mais alto orçamento disponível, pois além de empregar o estado da arte em soluções tecnológicas de eficiência energética, ainda é necessário a implementação de um sistema de geração de energia elétrica renovável, para que o restante do consumo energético do edifício seja compensado pela energia elétrica produzida. Para que essa alternativa seja viável, um orçamento mínimo de R\$515/m² do edifício é exigido

É importante ressaltar que os resultados de eficiência energética a serem obtidos são variáveis, pois dependem das características particulares de cada edifício. Portanto, seus valores não são absolutos e sim estimativas, ou seja, é possível que a eficiência realmente alcançada em um edifício seja um pouco maior ou menor do que a desejada inicialmente.

5.3 CRITÉRIOS BÁSICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Alguns critérios básicos devem ser cumpridos pelo edifício em estudo, para que seja possível determinar de ante-mão se o edifício é capaz de atingir o nZEB. Caso contrário, a metodologia ainda poderá ser utilizada como um guia para melhorar sua eficiência energética. Esses critérios básicos são discutidos a seguir.

- **ORÇAMENTO**

Quase a totalidade de tipos de intervenções realizadas com o objetivo de melhorar a eficiência energética do edifício exige que um certo orçamento esteja disponível para pagar o valor do investimento inicial da intervenção desejada.

Portanto, deve ser definido um orçamento mínimo para que, pelo menos, as intervenções com menor custo inicial possam ser implementadas de maneira correta. Caso o orçamento disponível seja insuficiente para que qualquer tipo de solução seja implementada, não será possível melhorar a eficiência energética do edifício, muito menos atingir o balanço energético nulo.

É comum que um orçamento limitado esteja disponível para grandes intervenções na maioria dos edifícios, pensando nisso, algumas prioridades foram definidas, das que apresentam melhor economia energética à um custo inicial menor para o maior.

- I. Alterações de envoltória: Uma envoltória precária é extremamente prejudicial à eficiência energética de um edifício, principalmente pelo grande ganho de calor e infiltrações que ocorrem através de janelas e fachadas com mau estado de conservação. Tudo isso ainda contribui significativamente com a carga térmica sensível do edifício. Realizar intervenções na envoltória do edifício, como por exemplo, substituição de janelas de vidro simples por janelas com camada dupla, ou melhorar o isolamento térmico com paredes e fachadas internas de menor transmitância térmica são pequenas intervenções que geram grandes reduções no consumo energético de um edifício. Podem ser desde pequenas intervenções até intervenções que afetem o edifício inteiro, com baixo custo de implementação e apresentam alta relação custo-benefício entre o investimento necessário e a redução de consumo do edifício.
- II. Substituição da iluminação atual por uma mais eficiente: Substituir lâmpadas com tecnologia mais antiga, como incandescentes ou fluorescentes por modelos mais eficientes, a tecnologia mais atual utilizada são lâmpadas com tecnologia LED, reduzem o consumo de energia elétrica, além de contribuírem diminuindo a carga térmica interna dos edifícios, diretamente ligada aos sistemas de climatização, gerando impacto maior na economia.

III. Modernização do sistema de climatização: Responsáveis por quase metade do consumo de energia elétrica de edifícios em geral, estão diretamente ligados à envoltória e iluminação de um edifício. Pois com uma envoltória precária e iluminação ineficiente, um sistema de ar condicionado, por mais eficiente que seja, terá um alto consumo de energia elétrica. Portanto, é necessária uma envoltória e sistema de iluminação eficiente para que o sistema de climatização seja dimensionado para a nova carga térmica sensível do edifício e opere na condição mais eficiente possível. Nessas condições, é o equipamento que apresenta maior capacidade de melhoria de eficiência energética, mesmo que a um investimento inicial elevado.

- FATOR DE FORMA DO EDIFÍCIO (FF)

O fator de forma (FF) de um edifício é definido como a razão entre a área da envoltória (S) e o volume total da edificação (V). Para ser eficiente do ponto de vista energético, um edifício deve ter um fator de forma baixa. Pois, em uma casa simples, a área da envoltória é grande e o volume ocupado pelo edifício é relativamente pequeno (S/V alto), o que gera um ganho de calor maior, prejudicando a eficiência energética. Já em um edifício com vários andares, o volume ocupado pelo edifício é muito maior do que a área total da envoltória do mesmo (S/V baixo), isso diminui o ganho de calor pelo volume do edifício, já que há menos área disponível para aquecer seu volume, ajudando na eficiência energética do edifício.

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), de 2010, estipula valores mínimos e máximos para o fator de forma ser considerado energeticamente eficiente da zona bioclimática de Brasília, são eles: livre e 0,75, respectivamente. Para outras zonas climáticas deve-se consultar o regulamento.

Concluí-se então que para edifícios com fator de forma acima de 0,75, a eficiência energética do edifício é muito prejudicada, incapacitando-o de atingir o balanço energético nulo. Contudo, é possível continuar com a metodologia, como um guia de melhoria da eficiência energética.

- ÍNDICE DE CONSUMO ENERGÉTICO EXCESSIVAMENTE ALTO

A média de índice de consumo energético (ICE) internacional para edifícios comerciais, segundo a Energy Star, padrão internacional de consumo eficiente de energia, é de 167 kWh/m².ano. Edifícios com índices muito altos, com 50% ou mais acima da média internacional, ou seja, índices acima de 250 kWh/m².ano impossibilitam transformá-los em edifícios de balanço energético nulo. No entanto, a metodologia pode ser aplicada como uma melhoria da eficiência energética, com o objetivo de reduzir esse índice.

5.4 1ª ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO

O primeiro passo para que o aumento da eficiência energética de um edifício seja alcançado é conhecer as características atuais do edifício. Essa fase da metodologia é de extrema importância, pois quanto mais detalhada a descrição da situação atual do edifício, melhores resultados serão atingidos ao final do projeto.

5.4.1 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA ATUAL

Primeiramente, é necessário saber qual o consumo energético atual do edifício, para isso, faturas de energia elétrica antigas, relatórios de concessionárias, ou qualquer informação capaz de informar o consumo de energia do edifício devem ser levantados, em seguida, esses dados devem ser tratados de maneira que seja possível estimar o consumo energético mensal e anual do edifício.

5.4.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO EDIFÍCIO

Após essa etapa, algumas características gerais do edifício, que são de fácil obtenção, são necessárias, as principais delas são:

- Localização do edifício;
- Quantidade de pavimentos;
- Área total ocupada, em m²;
- Orientação geográfica do edifício;
- População fixa e flutuante;
- Horários de funcionamento e ocupação do edifício;
- Quantidade de entradas principais e secundárias;
- Atividade predominante exercida.

5.4.3 CARACTERÍSTICAS DE ENVOLTÓRIA

Algumas características construtivas do edifício também devem ser conhecidas, por serem mais difíceis de obter, deve ser dada uma maior atenção a essa etapa do projeto, são elas:

- Propriedades construtivas das paredes externas e da cobertura do edifício (como foram construídas e quais materiais foram utilizados), com o valor resultante de transmitância térmica, se possível;

- Propriedades de vidros e esquadrias utilizados na fachada do edifício (qual tipo de vidro e esquadria utilizados, presença de borracha de vedação na esquadria, etc), com o valor resultante de transmitância térmica, se possível;

Todas essas características construtivas são discutidas com maiores detalhes na seção 4.2 – Alternativas de Envoltória.

5.4.4 CARACTERÍSTICAS DE ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Também são necessárias informações relevantes à iluminação e equipamentos elétricos do edifício, com os seguintes parâmetros de maior importância necessários:

- Presença de iluminação natural;
- Tipo de luminárias utilizadas (fechadas ou abertas, de embutir ou sobrepor, com ou sem controle de ofuscamento, entre outros);
- Tipo de lâmpadas utilizadas (LED, fluorescente, entre outras);
- Quantidade de luminárias utilizadas em cada pavimento;
- Quantidade de lâmpadas utilizadas por luminária em cada pavimento;
- Potência total dos equipamentos elétricos utilizados no edifício;

Todas essas informações também são discutidas com maiores detalhes na seção 4.3 – Alternativas de iluminação.

5.4.5 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

As características do sistema de climatização do edifício também devem ser conhecidas, sendo as principais delas:

- Tipo de sistema de climatização (Expansão indireta com condensação a ar, expansão direta, entre outros);
- Tipo e quantidade de unidades condensadoras (Chiller com condensação a ar ou a água, VRF, entre outros);
- Capacidade de refrigeração de cada unidade condensadora, em kW;
- Tipo de fluido refrigerante primário, e se houver, secundário;
- Tipo e quantidade de unidades evaporadoras (Split, fan-coil, etc);

- Tipo e quantidade de bombas, se existentes;
- Tipo e quantidade de torres de resfriamento, se existentes;
- Consumo de água das torres de resfriamento, em m³, se existentes;
- Outras características de climatização pertinentes.

Todas as características de climatização são discutidas com maiores detalhes na seção 4.4 – Alternativas de climatização.

Para que a simulação computacional seja capaz de fornecer resultados de carga térmica precisos, é necessário a caracterização de vários parâmetros, como:

- Cidade de projeto;
- Estrutura física do ambiente (dimensões);
- Envoltória do ambiente;
- Fontes internas de calor;
- Perfil de ocupação;
- Sistema de climatização atual.

Desses parâmetros, a estrutura física, a envoltória do ambiente, as fontes internas de calor e o sistema de climatização atual já foram analisados, os parâmetros restantes devem ser caracterizados para o cálculo de carga térmica.

Para que todas essas informações sejam obtidas, visitas técnicas devem ser realizadas, onde inspeções visuais e até mesmo medições nos equipamentos devem ser feitas, para melhor descrever os passos acima. Uma alternativa com grande impacto, se realizada, é um levantamento de pavimento por pavimento, onde medições de temperatura e umidade relativa do ar são feitas, bem como uma caracterização do edifício andar por andar, onde informações como equipamentos, tipos de iluminação e quantidade de pessoas por andar são incluídas em um formulário, utilizado na simulação computacional.

Outra sugestão é a formulação de um questionário, no qual os usuários do edifício indiquem sua opinião em aspectos como conforto térmico, acústico, qualidade do ar interior, entre outros itens. Com isso é possível traçar um relatório preliminar da situação de climatização atual do edifício e a qualidade do ar interior.

5.4.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO

Finalmente, o edifício deve ser simulado computacionalmente, com o auxílio de um *software* dedicado, como o EnergyPlus, por exemplo. A simulação leva em consideração a localização do edifício, sua geometria, orientação geográfica, área ocupada, quantidade de pavimentos, características construtivas, de iluminação, equipamentos de climatização, condições climáticas, rotina de ocupação do edifício, entre outros parâmetros.

Conclui-se então que a qualidade do trabalho realizada no levantamento de dados da condição atual do edifício reflete diretamente a qualidade da simulação computacional. Com os dados disponíveis de consumo energético de equipamentos, iluminação e climatização, o modelo simulado do edifício pode ser validado. Essa validação é realizada primeiramente tendo como referência o consumo energético anual do edifício, com as informações de consumo mensais sendo implementadas depois.

Os resultados da simulação computacional são apresentados em forma de relatório, gerado pelo próprio software, com todas as informações necessárias para avaliar a eficiência energética do edifício. Os resultados principais desejados da simulação computacional são os perfis de consumo energético estimados e o perfil de carga térmica do edifício.

5.4.7 SIMULAÇÃO – PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO

Com o relatório de resultados da simulação computacional é possível obter o consumo total de energia elétrica durante um ano de uso, para comparação com o consumo calculado através das faturas de energia elétrica fornecidas e é possível obter o perfil de consumo de energia.

5.4.8 SIMULAÇÃO – CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA

Para que o cálculo de carga térmica seja realizado, é necessário a caracterização de vários parâmetros, além dos já obtidos na fase de caracterização geral do edifício. Como:

- Cidade de projeto;
- Perfil de ocupação;

Com esses parâmetros definidos, o perfil de carga térmica pode ser calculado.

5.5 2ª ETAPA: PROPOSTAS DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Essa etapa é considerada uma das mais importantes em toda a metodologia, pois, se bem realizada, permite que o edifício reduza significativamente o consumo de energia elétrica e se aproxime do nearly-ZEB, objetivo principal do trabalho.

Devido a importância dessa etapa da metodologia, será adotada uma forma de abordagem um pouco diferente, conhecida como otimização.

5.5.1 OTIMIZAÇÃO

Otimização é o processo de encontrar condições que maximizem ou minimizem os valores de um objetivo (STOECKER, 1989). Aliado a todo processo de otimização está a decisão de qual critério será escolhido para ser otimizado. Por exemplo, custo mínimo de produção é, em geral, um dos critérios mais comuns na indústria. No caso de eficiência energética em edifícios, o critério selecionado é o de menor índice de consumo energético (ICE) possível, sendo definido como o consumo de energia elétrica de um edifício ao longo de um ano, dividido pela sua área total, ou kWh/m² ano.

Uma otimização é caracterizada por duas fases: a definição de um objetivo a ser maximizado ou minimizado e as restrições associadas a esse objetivo. A seguir cada fase será descrita.

O objetivo, como o próprio nome sugere, é a motivação que leva ao desejo ou necessidade de otimizá-lo, que pode partir desde a motivação de encontrar o melhor caminho para ir ao trabalho até qual o menor peso possível no desenvolvimento de uma aeronave. No caso de atingir o objetivo de balanço energético nulo em edifícios comerciais já existentes, a motivação é a otimização do consumo energético do edifício como um todo.

OBJETIVO → DIMINUIR ÍNDICE DE CONSUMO ENERGÉTICO → MINIMIZAR → $\frac{kWh}{m^2 \text{ano}}$

Considerando apenas o objetivo, seria simples minimizar o consumo energético com medidas consideradas ridículas, como a desativação do sistema de ar condicionado, ou diminuir pela metade o número de lâmpadas e luminárias do edifício. Essas medidas são incabíveis, pois prejudicam a saúde do trabalho e conseqüentemente a produtividade em ambientes comerciais. É aí que entram as restrições associadas ao objetivo, que são requisitos mínimos a serem seguidos de maneira a garantir a salubridade e conforto dos ocupantes do edifício. As principais restrições associadas à melhoria da eficiência energética são discutidos a seguir:

- ORÇAMENTO

Como o presente trabalho lida com edifícios comerciais já existentes, as propostas de melhoria de eficiência energética são baseadas em alternativas de *retrofit*, e a restrição à adoção ou não dessas alternativas depende essencialmente do orçamento disponível para realizar essas intervenções.

As prioridades para cada nível de orçamento foram descritas em detalhes na seção 5.3.

- CARGA TÉRMICA

Para se atingir a máxima eficiência energética de um edifício primeiramente é necessário reduzir ao máximo as cargas térmicas sensíveis do ambiente, através de intervenções na envoltória e no sistema de iluminação do edifício. Esses itens são discutidos em detalhes nas seções 5.4.3 e 5.4.4. Após essa redução, o cálculo de carga térmica de climatização do edifício deve ser realizado, seja através de simulação computacional ou planilhas de cálculo.

Essa carga térmica mínima do edifício deve ser obedecida, selecionando um equipamento de climatização com potência condizente com a carga térmica a ser tratada. Pois, considerando apenas a redução do índice de consumo energético (ICE), seria simples selecionar um equipamento de climatização com potência inferior à carga térmica mínima do edifício. Além dessa escolha infringir a restrição de carga térmica, ainda infringe a restrição de conforto térmico dos ocupantes do edifício, discutida a seguir.

- CONFORTO TÉRMICO E QUALIDADE DO AR

De acordo com a norma ABNT NBR 164101-2 de 2008, os parâmetros ambientais que afetam o conforto térmico são: temperatura operativa, velocidade do ar e umidade relativa. Esses parâmetros dependem de de fatores pessoais, como o tipo de roupa sendo usado pelas pessoas e o nível de atividade que as pessoas exercem no local de trabalho. Ainda segundo a norma ABNT, os valores de temperatura operativa e umidade relativa do ar devem permanecer dentro de certos limites, são eles:

- Entre 22,5°C e 26,0°C e umidade relativa entre 35% e 65% para o verão; e
- Entre 21,0°C e 24,0°C e umidade relativa entre 30% e 60% para o inverno.

A Figura (5.2) apresenta os limites de temperatura e umidade relativa do ar, segundo a ASHRAE.

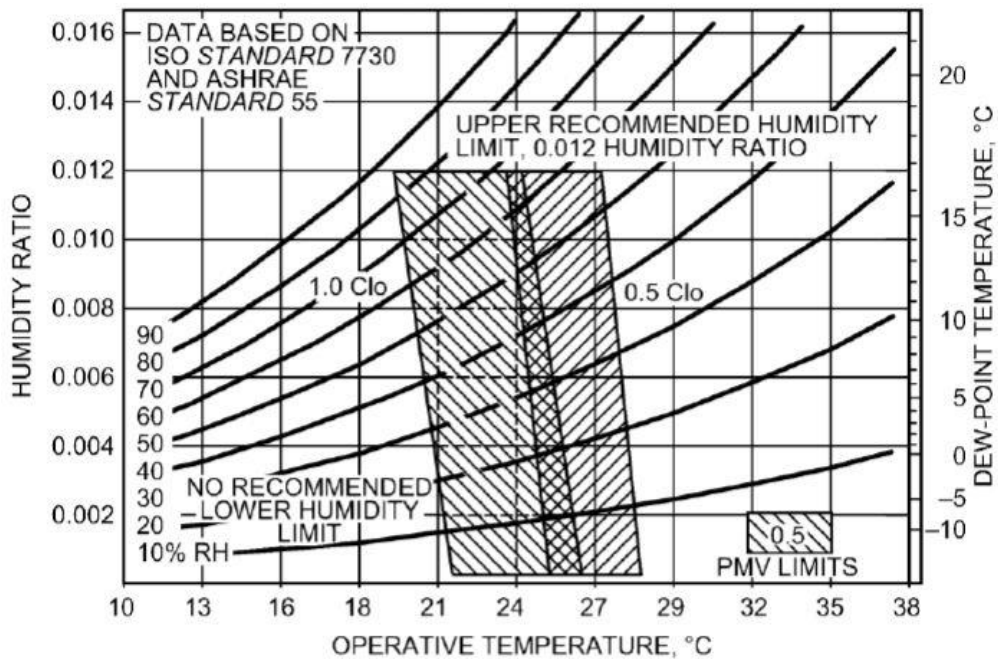


Figura 5.2 - Limites de temperatura operativa e umidade relativa do ar (ASHRAE)

No que diz respeito à qualidade do ar interior, um ar é considerado de qualidade aceitável quando não contém poluentes em concentração prejudicial à saúde ou ao bem-estar e é considerado satisfatório por pelo menos 80% dos ocupantes do edifício. A norma ABNT NBR 16401-3 de 2008 especifica parâmetros básicos e os requisitos mínimos para sistemas de climatização para: vazões mínimas de ar exterior e níveis mínimos de filtragem do ar. Podendo ser aplicados tanto a sistemas centrais, como uma central de água gelada, como sistemas unitários, como Splits.

O controle da qualidade do ar é feito pelo sistema de ar condicionado, que realiza a renovação de ar exterior e filtra todo o ar insuflado pelo ambiente. Essa renovação de ar reduz a concentração de poluentes gasosos, biológicos e químicos no ambiente que por algum motivo não foram retidos nos filtros. Essa filtragem do ar serve para diminuir a concentração de poluentes trazidos pelo ar exterior e os gerados internamente são transportados pelo ar recirculado, evitando acumulação. Para que a qualidade do ar interior seja mantida, manutenções no sistema de ar condicionado devem ser realizados periodicamente de maneira a garantir o funcionamento correto dos equipamentos e consequentemente uma boa qualidade do ar.

Além disso, a norma ABNT apresenta um capítulo que estipula a vazão mínima de ar exterior que deve ser suprida pelo sistema para promover a renovação de ar e manter as concentrações dos poluentes no ar em nível aceitável. A vazão mínima de ar exterior é dada pela Eq. (8).

$$V_{ef} = P_z * F_p + A_z * F_a \quad (8)$$

onde,

V_{ef} é a vazão eficaz de ar exterior, expressa em litros por segundo (L/s);

P_z é o número máximo de pessoas na zona de ventilação;

F_p é a vazão de ar por pessoa, expressa em litros por segundo (L/s);

A_z é a área útil ocupada pelas pessoas, expressa em metros quadrados (m²);

F_a é a vazão por área útil ocupada, expressa em (L/s * m²).

Os valores de vazão de ar por pessoa e vazão por área útil ocupada para edifícios comerciais são apresentadas na Tab. (5.1). Os demais valores da Eq. (8) dependem de cada edifício em estudo.

Tabela 5.1 - Valores de vazão para edifícios de escritórios (ABNT, 2008)

Local	D pessoas/100 m ²	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Exaustão Mecânica
		Fp (L/s*pessoa)	Fa (L/s*m ²)	Fp (L/s*pessoa)	Fa (L/s*m ²)	Fp (L/s*pessoa)	Fa (L/s*m ²)	L/s*m ²
Edifícios de escritórios								
Hall do edifício, recepção	10	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	0
Escritórios de diretoria	6	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	0
Escritório com baixa densidade	11	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	0
Escritório com média densidade	14	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	0
Escritório com alta densidade	20	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	0
Sala de reunião	50	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	0
CPD (exceto impressoras)	4	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	0
Sala impressoras, copiadoras	0	0	0	0	0	0	0	2,5
Sala digitação	60	2,5	0,3	3,1	0,4	3,8	0,5	0
Call center	60	3,8	0,6	4,8	0,8	5,7	0,9	0

Legenda

Nível 1 - Nível mínimo de vazão de ar exterior para ventilação

Nível 2 - Nível intermediário da vazão de ar exterior para ventilação

Nível 3 - Vazões de ar exterior para ventilação que segundo estudos existem evidências de redução de reclamações e manifestações alérgicas

Fp - Fração do ar exterior relacionada às pessoas (L/s*pessoa)

Fa - Fração do ar exterior relacionada ao recinto (L/s*m²)

D - Densidade de ocupação esperada, referia à área útil ocupada (pessoas/100 m²)

A vazão a ser suprida na zona de ventilação é a vazão eficaz corrigida pela eficiência da distribuição de ar na zona:

$$V_z = \frac{V_{ef}}{E_z} \quad (9)$$

V_z = Vazão de ar externo a ser suprida na zona de ventilação [L/s];

E_z = Eficiência de distribuição de ar na zona (valore entre 0 e 1);

- CONFORTO AMBIENTAL

O conforto ambiental pode ser entendido como um conjunto de condições ambientais que permitem ao ser humano sentir bem estar térmico, visual e acústico. O conforto térmico foi tratado em um item separadamente, mas faz parte do pacote de conforto ambiental dos ocupantes.

No que diz respeito ao bem estar acústico, a norma ABNT NBR 10152 – “Níveis de ruído para conforto acústico” fixa os níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico em diversos ambientes. Para ambientes de escritório esses valores podem variar de 30 a 40 dB para salas de reunião, e entre 50 e 60 dB para salas de mecanografia. Qualquer ruído acima desses valores podem causar desconforto nos ocupantes e até prejudicar a saúde e produtividade. Por isso, é necessário realizar as medidas cabíveis para reduzir o nível de ruídos sonoros dos ambientes para a faixa determinada pela norma.

O conforto visual é definido como um conjunto de condições em um ambiente, no qual o ser humano possa desenvolver suas tarefas visuais com o máximo de acuidade e precisão visual, com o menor esforço e risco de prejuízos à vista. É portanto um importante fator a ser considerado na necessidade de iluminação em um edifício, pois uma iluminação inadequada pode causar fadiga visual, dor de cabeça, irritabilidade e pode provocar também erros e acidentes.

Uma boa iluminação deve ter direcionamento adequado e intensidade suficiente sobre o local de trabalho, além de proporcionar boa definição de cores e ausência de ofuscamento. Essas condições estão relacionadas a requisitos necessários para um bom conforto visual, definidos pela Comissão Européia de 1994. São elas: iluminância suficiente, boa distribuição de iluminâncias, ausência de ofuscamento, contrastes adequados e bom padrão e direção de sombras.

A norma ABNT NRB 5413 de 1992 fixa as iluminâncias mínimas a serem atingidas em função do tipo de tarefa visual. A Tabela (4.3) apresenta esses valores.

Concluí-se que para edifícios comerciais as tarefas de leituras e escritas de documentos são as mais comumente executadas, portanto é necessário uma iluminância entre 500 e 2000 lux, dependendo da situação.

Para a luz solar, existe uma conversão aproximada de 0,0079 W/m² para cada lux, estendendo essa aproximação para iluminação de lâmpadas, tem-se que a potência de iluminação por área para edifício comerciais deve estar entre 4 W/m² e 15,8 W/m².

Obecendo as restrições aqui apresentadas, será possível atingir um ponto mínimo de consumo energético sem prejudicar o conforto dos ocupantes do edifício, bem como as tarefas por elas desempenhadas.

Com essa etapa concluída, é necessário definir quais alternativas de *retrofit* serão implementadas no edifício em questão. Esses pontos serão discutidos nos itens a seguir.

5.5.2 PROPOSTAS DE CLIMATIZAÇÃO

O departamento de energia dos Estados Unidos (DOE) define que um projeto de *retrofit* de climatização em um edifício pode ser abordado através de 7 passos, demonstrados a seguir:

1. Definir as necessidades e serviços necessários dos ocupantes do prédio. Inicie a definição pelos resultados desejados, e não a solução;
2. Analisar e compreender as estruturas e sistemas atuais do edifício. Quais necessidades não estão sendo atendidas? Por que não?
3. Compreender o escopo e custos de renovações necessárias e/ou planejadas. Quais sistemas ou componentes necessitam de substituição ou renovação?
4. Reduzir cargas, em um primeiro instante através de alternativas passivas, como a adição de isolamento térmico, em seguida, pela especificação de equipamentos de ventilação mais eficientes;
5. Após reduzir ao máximo as cargas, considerar qual sistema de ar condicionado é o mais apropriado e dentro dessas opções, selecionar o sistema mais eficiente;
6. Otimizar estratégias de controle e automação;
7. Garantir a realização do projeto proposto e seus benefícios.

O foco dessa seção da metodologia está principalmente no item 5, onde deve-se levar em consideração qual o sistema de ar condicionado é o mais apropriado, e selecionar o mais eficiente dentre eles.

Obedecendo as restrições de otimização descritas no item 5.5.1, como carga térmica, conforto térmico e qualidade do ar interior, deve-se selecionar uma alternativa de *retrofit* de equipamento de climatização que seja mais eficiente energeticamente.

Levando isso em consideração, recomenda-se a seleção de uma ou várias das alternativas de *retrofit* de equipamentos de climatização e novas tecnologias que podem ser empregadas foram apresentadas em detalhes na seção 4.4 – Alternativas de Climatização.

5.5.3 PROPOSTAS DE ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Esse tópico já foi discutido em detalhes na seção 4.3 – Alternativas de Iluminação. Recomenda-se a seleção de alternativas de novos equipamentos de iluminação, com tecnologias atuais e mais eficientes no processo de melhoria da eficiência energética do edifício. Lembrando que a seleção de novos equipamentos devem obedecer à restrição de conforto ambiental visual do objetivo a ser otimizado.

5.5.4 PROPOSTAS DE ENVOLTÓRIA

Novamente, esse tópico já foi descrito detalhadamente na seção 4.2 – Alternativas de Envoltória. Recomenda-se a seleção de algumas das alternativas descritas na seção, com objetivo de melhorar a eficiência energética do edifício, desde que sejam obedecidas as restrições de conforto acústico e escolha de alternativas com menor transmitância térmica e absorvância.

5.5.5 PROPOSTAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Recomenda-se a adoção de um sistema de controle e automação, dedicado ao monitoramento contínuo da instalação, para qualquer nível de intervenção a ser realizado, desde os mais simples, como troca de lâmpadas até intervenções completas, com modernização do sistema de climatização e implementação de um sistema de geração renovável. De forma a garantir que o edifício opere em condições ótimas, que consequentemente reduz o consumo de energia.

Um sistema de controle e automação é formado basicamente por 3 itens:

- Instrumentação: composto por todos os sensores de temperatura, pressão, vazão, chaves de fluxo, pressostatos, alarmes, etc., além do cabeamento e roteadores necessários;
- Válvulas de controle e atuadores: composto por variadores de frequência, válvulas de balanceamento hidráulico, registros, válvulas de duas vias, solenóides, etc.
- Sistema de supervisão: composto pelo software de gestão de toda a instrumentação e válvulas de controle e atuadores, implementando as regras de controle e acionamento de alarmes necessárias e disponibilizando recursos de gestão energética.

O custo estimado para a adoção de um sistema de controle e automação é feita a partir da contratação de um projeto específico para cada edifício.

5.5.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS

Uma nova simulação computacional deve ser realizada com as novas propostas de *retrofit*, tendo como objetivo os novos perfis de consumo energético total do edifício e a nova carga térmica do edifício depois das melhorias aplicadas.

É importante que uma comparação entre o novo cenário proposto e a situação atual do edifício seja feita, destacando as diferenças de consumo energético total e a diferença de carga térmica de refrigeração. Finalmente, é possível chegar a uma conclusão de qual das alternativas de *retrofit* propostas se adequa melhor para cada tipo de edifício, apresentando como resultado a maximização da eficiência energética do edifício e a redução do consumo de energia elétrica.

5.6 3ª ETAPA: IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL

5.6.1 TIPO DE LIGAÇÃO DO EDIFÍCIO COM A REDE DE CONCESSIONÁRIA

Antes de qualquer análise de implementação de sistema de geração de energia renovável, deve-se considerar o tipo de ligação do edifício com a rede de energia da concessionária, condição que é de extrema importância para a possibilidade de se atingir o balanço energético nulo. Se o edifício é independente da rede, utilizando toda a sua energia elétrica através de fontes renováveis e armazenando-a num banco de baterias, torna-se muito difícil atingir o balanço energético nulo. Por exemplo, um Shopping Center que deseja ser construído de maneira autossuficiente em relação ao consumo de energia elétrica precisará de um banco de baterias tão gigantesco para armazenar a energia elétrica necessária para seu funcionamento adequado que o seu custo inviabiliza o projeto.

Logo, é preferível que para atingir o balanço energético nulo em edifícios, eles sejam conectados à rede e que, no contrato de ligação com a concessionária exista a possibilidade de crédito financeiro recebido pela exportação de energia gerada *on-site*, assim, o valor da fatura de energia elétrica é abatido pelo crédito financeiro dado pela concessionária pela injeção de energia elétrica da geração.

5.6.2 DISPONIBILIDADE PARA GERAÇÃO ON-SITE

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis é essencial para que o conceito de nZEB seja atingido. A seguir será discutido quais informações são mais relevantes para a seleção de um sistema de geração de energia elétrica por fontes renováveis.

Alguns fatores limitam quais alternativas de geração *on-site* podem ser utilizadas em cada edifício, são alguns deles:

- Área disponível na cobertura para instalação de painéis fotovoltaicos;
- Condições climáticas favoráveis a utilização de equipamento de aquecimento de água e climatização de ambientes solar;
- Histórico de região com alta incidência de ventos, justificando a utilização de turbinas eólicas de pequena capacidade;
- Características térmicas do solo, justificando a utilização de sistemas geotérmicos para geração de energia.

Alternativas de geração de energia elétrica *on-site* são detalhadas na Tab. (4.11). Recomenda-se a escolha de algumas dessas alternativas para serem implementadas, caso seja possível.

Caso o edifício não tenha disponibilidade para implementação de nenhuma das alternativas de geração de energia elétrica por falta dos fatores citados acima, ainda é possível que o edifício faça uso de energias renováveis, sendo elas do tipo *off-site*. Para o caso de importação de energia elétrica, é de extrema importância certificar-se que as fontes das energias importadas para uso no edifício sejam de fato renováveis. Alternativas de geração de energia elétrica *off-site* são detalhadas na Tab. (4.12).

5.6.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO

Uma simulação computacional deve ser realizada para cada proposta de geração apresentada, com o auxílio de um *software* dedicado, como o PVSyst para casos de fotovoltaicas, por exemplo, tendo como objetivo a estimativa de capacidade de geração de energia elétrica de cada solução proposta. É importante que uma comparação entre as soluções de geração propostas e a situação atual do edifício seja feita, com o objetivo de destacar a diferença entre a capacidade de geração atual, se existente, e das soluções propostas, além de verificar a economia no consumo de energia proporcionada por cada solução, refletidas na fatura de energia elétrica do edifício.

Finalmente, é possível chegar a uma conclusão de qual das alternativas de geração de energia elétrica propostas se adequa melhor para cada tipo de edifício, apresentando como resultado a máxima produção de energia renovável possível.

5.7 4ª ETAPA: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

O objetivo de um estudo de viabilidade é apresentar uma análise econômica para viabilidade de projetos, esse estudo de viabilidade é feito através de diversos métodos de avaliação de projetos, que quando aplicados resultam em um número, que expressa a rentabilidade do projeto.

5.7.1 CUSTOS INICIAIS DE IMPLEMENTAÇÃO

Para a análise de viabilidade econômica é necessário estimar os custos de cada alternativa. Inicialmente são avaliados os custos iniciais das alternativas implementadas, que são formados pelos custos de cada equipamento ou componente envolvido e ainda os custos relacionados à obra de implementação, se for necessária tal intervenção.

5.7.2 CUSTOS OPERACIONAIS

Em seguida, deve-se realizar um levantamento de custos operacionais dos equipamentos, como manutenção, consumo de energia, consumo de água e tratamento químico de água no caso de equipamentos de ar condicionado.

Com os custos iniciais de implementação e operacionais, é possível começar a análise de viabilidade econômica propriamente dita, passando por conceitos abordados detalhadamente no capítulo (3).

5.7.3 DEFINIÇÃO DA TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE

Primeiramente deve-se definir uma taxa mínima de atratividade, no caso de ser necessário um investidor externo para patrocinar o projeto. O conceito de TMA é discutido na seção (3.2).

5.7.4 PAYBACK

Em seguida é realizado o cálculo de *payback*, que utiliza os conceitos de taxa mínima de atratividade e valor presente líquido para poder ser efetuado. O cálculo de *payback* é descrito com mais detalhes na seção (3.4).

5.7.5 TAXA DE RENTABILIDADE E ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE

Finalmente, a taxa de rentabilidade, que é função do valor presente líquido e do valor presente das parcelas de saída, deve ser calculada. Com a taxa de rentabilidade obtida, basta somar 1 para obter o índice de lucratividade. Se esse índice for maior ou igual a 1 é um indicio de que o investimento é considerado financeiramente atrativo.

5.7.6 RESULTADOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Ao final do estudo de viabilidade econômica para o caso em questão, deve-se apresentar os resultados obtidos, principalmente de *payback* e índice de lucratividade, para que a administração do edifício possa decidir se o investimento é vantajoso ou não.

Um exemplo prático será apresentado no capítulo 7 – Metodologia aplicada ao estudo de caso para que sua compreensão seja mais fácil. Porém, é necessário enfatizar a importância da análise de viabilidade econômica estar presente dentro da metodologia, e não como uma etapa opcional no processo de melhoria de eficiência energética de um edifício. Pois, essencialmente é com uma boa análise econômica que é decidido se um projeto é colocado em prática ou não.

6. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo o estudo de caso é apresentado, introduzindo o edifício, suas características de envoltória, iluminação e ar condicionado, além do consumo de energia elétrica.

6.1 O EDIFÍCIO BRASÍLIA TRADE CENTER

O Brasília Trade Center é um edifício comercial localizado na cidade de Brasília, no Setor Comercial Norte. Foi inaugurado em 1990 e o edifício principal é composto de 27 andares, distribuídos em 4 subsolos, 1 térreo, sobreloja, 17 pavimentos comerciais, casa de máquinas no 19º andar e cobertura no 20º andar. 308 unidades autônomas estão distribuídas nos pavimentos comerciais e na sobreloja. Além do edifício principal há também um anexo, ocupado atualmente por uma agência bancária, que é composto de 2 andares, térreo e primeiro andar. Medindo 75 metros nos lados Norte e Sul e 40 metros nos lados Leste e Oeste, ocupa uma área total de 3.000 m².



Figura 6.1 - Edifício Brasília Trade Center (Brasília Trade Center, 2017).

O edifício possui uma população fixa de 718 pessoas, considerando funcionários e prestadores de serviço e uma população flutuante de em média 250 pessoas, além de 8 brigadistas que revezam os turnos de plantão.

Desde sua inauguração o prédio passou por diversas melhorias estruturais, a primeira delas foi a reforma da fachada, iniciada em 2011, bem como reformas para troca de luminárias e lâmpadas. O sistema de climatização nunca foi renovado desde a concepção do prédio.

O condomínio possui um total de seis elevadores, dos quais três operam do 4º subsolo até o 10º andar. Outros dois operam do 4º subsolo ao térreo e do 10º ao 19º andar, não atendendo os andares 1 até 9. Por último há um elevador de serviço que opera do 3º subsolo ao 19º andar, exceto a sobreloja. Pensando na acessibilidade, todos os elevadores possuem botoeiras em braile e indicação de andar por alerta sonoro.

O edifício conta com algumas medidas de melhoria da qualidade e diminuição do consumo de energia elétrica do prédio, como o sistema Redulight de proteção, que se trata de um filtro de energia que elimina picos e interferências causadas por oscilações na rede elétrica, que geram um excesso de consumo de energia elétrica.

O prédio conta também com um grupo motor gerador, com capacidade de 170 kVA, que alimenta o elevador de serviço, iluminação dos halls e escadas, a central de controle, a recepção, os portões, catracas e cancelas no caso de ocorrer falta de fornecimento de energia pela concessionária.

O sistema de prevenção e combate a incêndio do edifício é composto por: Central de detecção de incêndio, alarme de incêndio, portas corta-fogo, sinalização de pânico e fuga, iluminação de emergência, hidrantes, extintores e sistemas de sprinklers.

Uma visita técnica foi realizada no edifício para que as condições atuais de envoltória, iluminação e sistema de ar condicionado do edifício fossem avaliadas. As conclusões atingidas são discutidas em maiores detalhes nas seções a seguir.

6.2 SISTEMA DE AR CONDICIONADO CENTRAL

O edifício adota atualmente um sistema de ar condicionado central, com sistema de expansão indireta usando água gelada como fluido refrigerante secundário, e também condensação a água. Os componentes do sistema de ar condicionado são descritos a seguir:

- 4 Chillers com condensação a água, com 2 em funcionamento pleno e os outros 2 em stand-by;
- Bombas de água gelada;
- Fan Coils como unidade evaporadora;
- Bombas de água de condensação;

- 3 Torres de resfriamento;
- Reservatório de reaproveitamento de água de condensação com capacidade de 5.000 litros;

6.3 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para que o perfil de consumo de energia elétrica do edifício fosse estimado, as faturas de energia dos anos de 2015, 2016 e 2017 foram obtidas. É importante ressaltar que apenas as faturas de energia elétrica do edifício principal foram analisadas, já que não foi possível obter as faturas de energia do anexo do edifício, atualmente ocupado por uma agência bancária. Analisando as faturas, os perfis de consumo energético do edifício foram traçados em um gráfico, apresentado na Fig. (6.2).

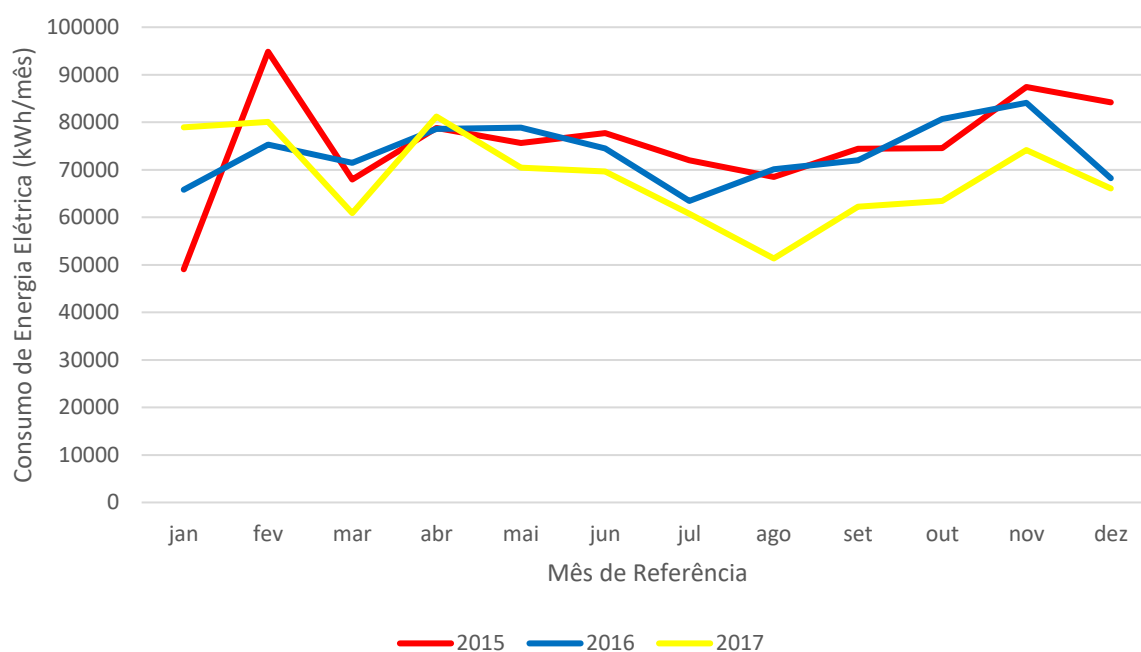


Figura 6.2 - Perfil de Consumo Energético do BTC

A área útil por pavimento foi definida através das plantas baixas do edifício e cada pavimento possui aproximadamente 750m². Dessa área total deve-se excluir áreas não iluminadas, como os fossos dos elevadores, que ocupam uma área de aproximadamente 40m², e áreas pouco iluminadas, como subsolos, depósitos, garagens, etc., portanto, a área útil por pavimento é de 710m² e o edifício principal tem uma área total de 16.330m².

O edifício anexo, ocupado pela agência bancária tem uma área total de 2.720m², divididos em térreo e primeiro andar. Com isso, a área total ocupada pelos edifícios é de 19.050m²

Com isso é possível padronizar o consumo energético do edifício, considerando que no ano de 2015 um total de 905.042 kWh foram consumidos, temos que o valor padronizado de consumo energético do edifício é de 55,42 kWh/m² ano. De maneira similar para os demais anos, tem-se que no ano de 2016, o

consumo total foi de 883.197 kWh e 54,08 kWh/m² ano e para o ano de 2017 foram consumidos 819.165 kWh e 50,16 kWh/m² ano. Ressaltando que esses valores de índice de consumo energético são apenas do edifício principal.

Analisando os três anos em conjunto, é possível perceber uma tendência de queda no consumo energético do edifício, pois em 2015 o consumo ficou oscilando perto dos 80.000 kWh/mês, com picos atípicos em dezembro de 2014 e janeiro de 2015, o que pode indicar falha em algum dos equipamentos presentes no edifício. O mesmo ocorre em 2016, onde o consumo oscila próximo aos 75.000 kWh/mês, com picos de consumo em outubro e novembro. Já em 2017 o consumo manteve-se próximo dos 70.000 kWh/mês, com picos máximos de até 80.000 kWh/mês e mínimos de 50.000 kWh/mês, isso mostra que algumas medidas para diminuir o consumo energético do edifício foram feitas entre 2015 e 2017, incluindo a reforma da fachada, que ocorreu no ano de 2015.

Analisando agora a variação no consumo energético ao longo do ano, é possível estabelecer uma relação entre todos os anos analisados. Nos meses mais quentes em Brasília, de setembro até janeiro é possível ver que o consumo energético do edifício aumenta. Já nos meses mais frios de inverno, entre maio e agosto, o consumo energético do edifício diminui. Com essas informações é possível inferir que o excesso de consumo nos meses mais quentes e a sobra de consumo nos meses mais frios são causados pelo sistema de climatização, que deve resfriar mais os ambientes em meses quentes e não necessita fazê-lo em meses frios.

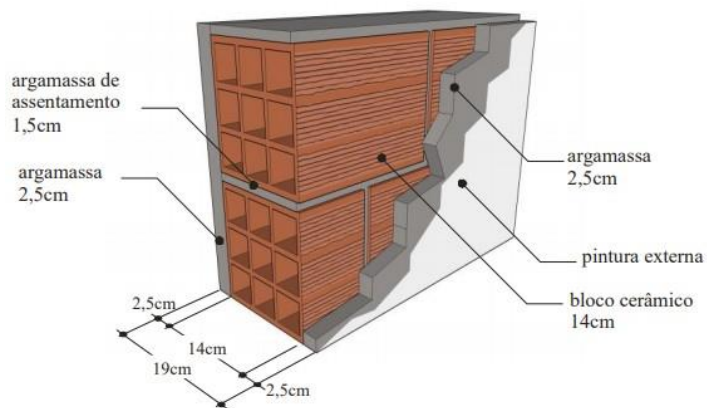
6.4 ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA

O edifício passou por uma revitalização de fachada no ano de 2015, onde foi realizada a troca de revestimento externo, esquadrias e vidros. Os fechamentos opacos, translúcidos e transparentes presentes atualmente no edifício são analisados nos próximos itens.

6.4.1 FECHAMENTOS OPACOS

- PAREDES

As paredes que constituem o edifício são paredes de alvenaria comum, com revestimento externo de porcelanato e fixação das placas de porcelanato através de argamassa. Segundo (LEHMKUHL, 2000), para paredes simples com tijolos furados (14cm de espessura), com reboco das duas faces da parede (1,5cm de espessura), juntas de argamassa (2,5cm de espessura) e revestimento com placa de porcelanato (1cm de espessura), a transmitância térmica é de aproximadamente 1,85 W/(m².K).



Descrição:

Argamassa interna (2,5cm)
 Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0cm)
 Argamassa externa (2,5cm)
 Pintura externa (α)

U	C_T
[W/(m ² K)]	[kJ/m ² K]
1,85	161

Figura 6.3 - Representação de parede simples utilizada no edifício BTC (INMETRO, 2013).

- COBERTURA

O edifício tem uma área total de cobertura de aproximadamente 3.000m², de acordo com dados fornecidos pelo próprio administrador do edifício. As figuras (6.4) e (6.5) retiradas do Google Maps® dão uma ideia de como a cobertura é construída.



Figura 6.5 - Cobertura do BTC e Anexo (Internet)

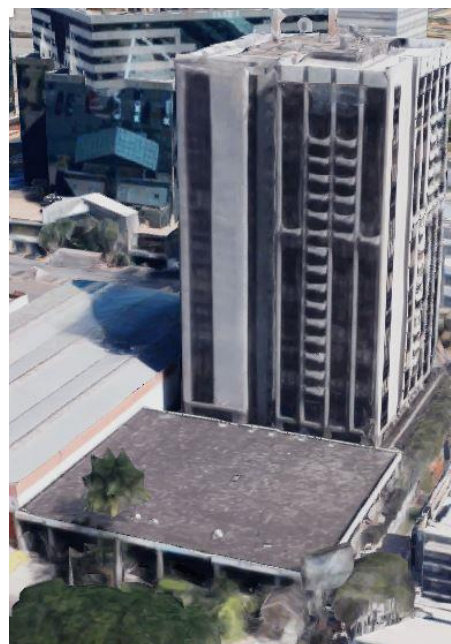
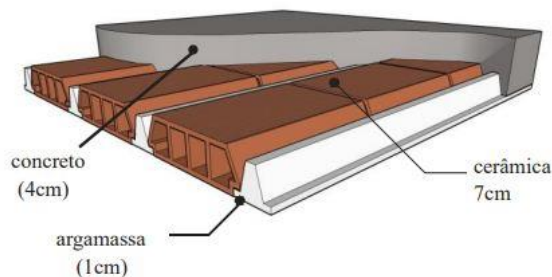


Figura 6.4 - Vista 3D do Brasília Trade Center e Anexo (Internet)

É possível notar que o telhado possui diferentes materiais construtivos, como cobertura de alvenaria simples, feita de laje pré-moldada sem nenhum tipo de telhamento, e uma cobertura de aço inoxidável com uma manta de poliuretano, com extremidade refletiva de alumínio aplicada sobre ela.

Segundo o “Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros” do INMETRO, para lajes pré-moldadas com espessura média de 12cm sem telhamento, a transmitância térmica é de 2,95 W/m².K. A Figura (6.6) demonstra o tipo de construção da laje.



Descrição:

Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm)
Sem telhamento

U [W/(m ² K)]	C _T [kJ/m ² K]
2,95	167

Figura 6.6 - Laje pré-moldada (INMETRO, 2013).

Uma foto da cobertura de laje pré-moldada do edifício foi tirada, para retratar melhor as condições atuais da cobertura. A foto é mostrada na Fig. (6.7).



Figura 6.7 - Foto da cobertura de laje pré-moldada do edifício (O AUTOR, 2018).

É possível concluir da foto que a laje apresenta, de maneira geral, uma boa condição, já que não há nenhuma trinca visível, ou qualquer tipo de falha que possa ser prejudicial à estrutura do prédio. Apresenta, porém, uma coloração escura, que como explicitado na seção de alternativas de envoltória é a condição de maior absorvância à radiação solar, o que aumenta a transmitância térmica do material.

Portanto, pode-se concluir que a transmitância térmica real da cobertura de laje pré-moldada será maior do que a transmitância térmica apresentada na Fig. (6.6).

Ainda de acordo com o Anexo Geral V, para coberturas com telhas metálicas sobre laje pré-moldada e câmara de ar maior que 5cm, a transmitância térmica é de 1,82 W/m².K, a Fig. (6.8) demonstra o tipo de cobertura.

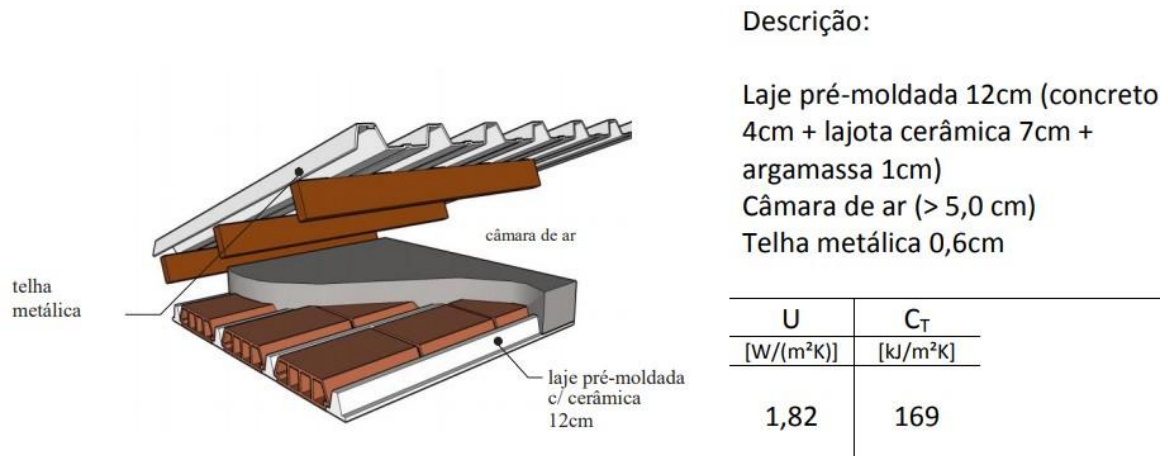


Figura 6.8 - Cobertura metálica sobre laje pré-moldada (INMETRO, 2013).

Uma foto da cobertura metálica foi tirada, para retratar as condições atuais da mesma, apresentada na Fig. (6.9).

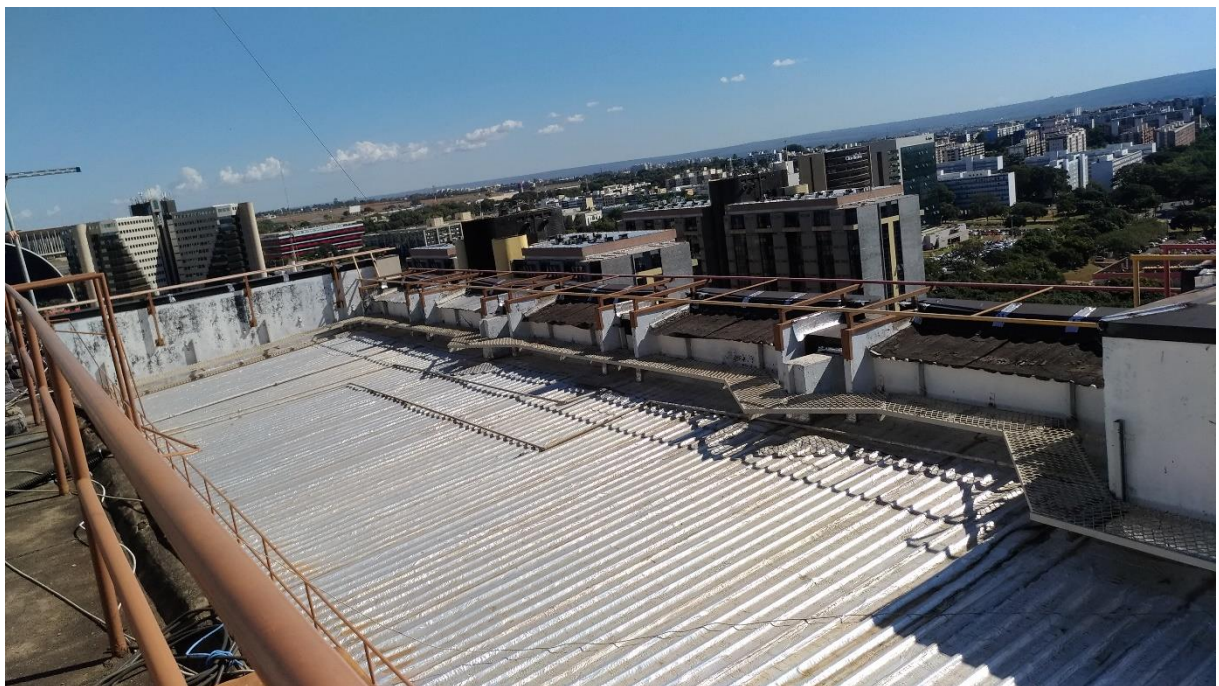


Figura 6.9 - Foto da cobertura metálica do edifício (O AUTOR, 2018).

Analisando a foto é possível concluir que a cobertura metálica apresenta boas condições e assume-se que o valor da transmitância térmica real da cobertura é igual a transmitância ideal apresentada na Fig. (6.8).

6.4.2 FECHAMENTOS TRANSLÚCIDOS E TRANSPARENTES

- VIDROS E ESQUADRIAS

Vidros e esquadrias constituem boa parte da área lateral do edifício e do prédio anexo, como é mostrado na Fig. (6.1). Com a reforma da fachada do edifício, todos os vidros e esquadrias foram substituídos por modelos mais novos.

Os vidros instalados durante a reforma são vidros do tipo monolítico de cor cinza, com espessura de 8mm, modelo SunGuard Silver 20 clear, ou similar. De acordo com o fabricante, esse modelo apresenta os seguintes benefícios: Reduz a entrada de calor e raios UVs, auxiliar na redução de consumo de energia elétrica, aumenta o conforto térmico. Além disso, apresenta alta transmissão de luz e baixo coeficiente de calor.

De acordo com o Anexo Geral V do INMETRO, esse modelo de vidro apresenta uma transmitância térmica de 4,410 W/m².K.

Vidro (ID)	Fabricante	Produto	Esp. (mm)	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Emis1	Emis2	Condutividade (W/mK)	Processo	U (W/m ²)	FS
51	GUARDIAN	Silver 20 clear	6,000	0,160	0,290	0,320	0,190	0,330	0,260	0,840	0,390	1,000	monolítico	4,410	0,270
52	GUARDIAN	Silver 20 clear	8,000	0,150	0,300	0,240	0,190	0,320	0,250	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,670	0,290
53	GUARDIAN	Silver 20 green	6,000	0,090	0,140	0,320	0,160	0,250	0,260	0,840	0,390	1,000	monolítico	4,410	0,240
54	GUARDIAN	Silver 20 green	8,000	0,100	0,170	0,240	0,170	0,260	0,250	0,840	0,840	1,000	laminado com incolor	5,670	0,290

Figura 6.10 - Propriedades Térmicas do vidro utilizado no edifício (Adaptado de INMETRO, 2013)

Nas esquadrias há borrachas de vedação para reduzir a infiltração de ar exterior no edifício e aumentar o conforto térmico e acústico dos ocupantes, após a visita técnica concluiu-se que o edifício possui boa estanqueidade quando se trata de infiltração de ar exterior através de janelas e esquadrias.



Figura 6.11 - Modelo de vidros e esquadrias adotados pelo edifício (O AUTOR, 2018).

- PORTAS E ABERTURAS

No edifício existem 2 entradas principais e mais 8 entradas auxiliares, nessas entradas não são utilizados nenhum tipo de equipamento para diminuir a infiltração de ar exterior e troca de calor por convecção, como camadas de barreira de vento, o que deixa espaço para melhoria.



Figura 6.12 - Entradas principais do edifício (O AUTOR, 2018).

Apesar de não haver métodos de diminuir infiltração de ar exterior no edifício, uma marquise de vidro monolítico de cor cinza é utilizada como forma de reduzir as trocas de calor por condução, convecção e radiação, além de permitir iluminação natural.

6.5 ANÁLISE DE ILUMINAÇÃO

Por se tratar de um edifício comercial com várias salas alugadas por diferentes locatários e empresas, um controle dos tipos de equipamentos de iluminação e lâmpadas utilizadas é muito difícil, pois cada locatário e empresa têm disponibilidade de adotar um tipo de iluminação diferente de outros.

Nas áreas comuns ao prédio, como recepção, corredores, *hall* de elevadores, escadas, subsolos, etc. são utilizadas luminárias de embutir de LED, que oferecem ótima iluminância e baixo consumo energético. Já nos corredores, escadas e subsolos, ainda são utilizadas lâmpadas tubulares fluorescentes com reatores eletrônicos e luminárias abertas de sobrepor sem controle de ofuscamento, que tem uma iluminância menor e maior consumo comparado à LED. Portanto, conclui-se que mesmo com as melhorias já realizadas, ainda há espaço para melhorias de eficiência energética em várias áreas do edifício.

Uma foto do padrão de iluminação utilizado em corredores, escadas e subsolo é apresentada na Fig. (6.13).



Figura 6.13 - Luminária utilizada em corredores, escadas e subsolo no BTC (O AUTOR, 2018).

6.6 ANÁLISE DE SISTEMA DE AR-CONDICIONADO

A central de água gelada (CAG) do edifício fica localizado no 4º subsolo, na casa de máquinas estão presentes 4 chillers de condensação a água, com R-22 como fluido refrigerante primário e água gelada como fluido secundário, ligados em paralelos, com um sistema de bombeamento de água gelada e água de condensação, além de 3 torres de resfriamento, também localizadas no 4º subsolo e fancoils como unidade evaporadora ao longo do edifício.

O chiller utilizado é do tipo casco e tubos, da marca ColdexTrane, com condensação a água, modelo 140NSB111111, série 101379, com potência declarada de 140TR. Cada chiller possui 4 compressores alternativos e 2 válvulas de expansão, então basicamente cada chiller têm 2 ciclos de refrigeração separados. No edifício um dos chiller está desativado a aproximadamente 6 meses.



Figura 6.14 - Chiller de condensação a água (O AUTOR, 2018).



Figura 6.15 - Vista em detalhe do sistema casco e tubo do chiller (O AUTOR, 2018).

Pelas fotos é possível observar que o isolamento térmico de alguns chiller foi removido, o que aumenta as perdas de calor e diminui a eficiência do equipamento, bem como propicia a condensação do vapor d'água presente no ar, que aumenta a corrosão dos equipamentos.

5 bombas de água gelada fazem a distribuição de toda a água para os fancoils do edifício, através de 10 tubulações de água gelada que se ramificam ao longo do prédio. 5 bombas de água de condensação fazem a distribuição da água para as torres de resfriamento, apresentadas na Fig. (6.16).



Figura 6.16 - Bombas de água gelada e água de condensação (O AUTOR, 2018).

Para análise das bombas é importante verificar a situação dos acoplamentos motor-bomba e das gaxetas de vedação, após visita técnica foi possível concluir que alguns acoplamentos estão muito desgastados e algumas gaxetas encontram-se desgastadas, sendo necessária a substituição de ambos.

As 3 torres de resfriamento são da marca Alpina e ficam localizadas também na casa de máquinas, e fazem uso de ventiladores centrífugos, ao invés do mais comumente utilizado ventilador axial.

O tratamento químico da água de condensação é feito por meio de bombas dosadoras, que fazem a mistura correta dos produtos utilizados no reservatório de água de condensação. A bomba dosadora é do tipo constante, então não leva em consideração as diferentes taxas de evaporação da água em função da época do ano, o que pode ocasionar em uma superdosagem de produtos químicos na água de condensação, que podem aumentar o nível de encrustação nas tubulações.

A água gelada produzida na CAG é bombeada através de 10 tubulações principais, espalhadas em 10 *shafts*, dessas tubulações principais, tubulações secundárias são ramificadas ao longo de 5 anéis de distribuição que levam a água gelada até as unidades evaporadoras para climatização do ar. A água gelada é bombeada através de um dos 10 *shafts* e distribuída para duas unidades evaporadoras a cada andar, como explicitado na Fig. (6.17).



Figura 6.17 - Distribuição de água gelada por prumada (O AUTOR, 2018).

Os fancoils utilizados são distribuídos em 19 andares, em 5 anéis de distribuição de água gelada. Os fan-coils são apresentados na Fig. (6.18).



Figura 6.18 - Fancoil original utilizado no edifício (O AUTOR, 2018).

7. METODOLOGIA APLICADA AO ESTUDO DE CASO

Este capítulo consiste na aplicação da metodologia apresentada no capítulo 5 ao estudo de caso do edifício Brasília Trade Center.

Neste capítulo a metodologia apresentada no capítulo 5 será aplicada, com as características relevantes do estudo de caso apresentado no capítulo 6.

7.1 NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICO A SER ATINGIDO

O trabalho se propõe a comprovar a metodologia para atingir balanço energético quase nulo em edificações. Portanto, para o estudo de caso foi selecionado o nível 4: eficiência energética entre 75% 100%. Com um orçamento mínimo de R\$515/m² de área do edifício.

7.2 CRITÉRIOS BÁSICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Nessa etapa será verificado se os critérios básicos para implementação da metodologia são cumpridos pelo edifício em questão.

- ORÇAMENTO

Como estudo de caso para validar a metodologia proposta, assume-se que o orçamento disponível para implementação das alternativas de retrofit e geração de energia renovável são iguais ao orçamento mínimo exigido pelo item (7.1).

O edifício Brasília Trade Center possui uma área total de 19.050m², portanto o orçamento disponível considerado é de R\$9.810.750.

- FATOR DE FORMA DO EDIFÍCIO (FF)

Como descrito no item (5.3) da metodologia, o fator de forma de um edifício é a razão entre a área total da envoltória (S) e o volume total da edificação (V).

O edifício em estudo possui uma área total de envoltória de 11.354,24m² e um volume total de 51.270m³. Logo, o fator de forma do edifício é:

$$FF = 0,22$$

Esse valor é menor que o limite superior de 0,75, portanto, a eficiência energética do edifício não é prejudicada pelo fator de forma, permitindo que o balanço energético nulo seja alcançado.

- ÍNDICE DE CONSUMO ENERGÉTICO EXCESSIVAMENTE ALTO

No item (6.3) do estudo de caso, o índice de consumo energético apenas do edifício principal para o ano de 2017 foi de 50,16 kWh/m².ano. Por mais que esse valor não leve em consideração o ICE do edifício anexo, ele é muito inferior ao limite estipulado. Portanto, considera-se que o ICE total do edifício e anexo são inferiores ao limite de 250 kWh/m².ano.

7.3 1ª ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO

7.3.1 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

No item (6.3) do estudo de caso foi feita a análise de consumo de energia elétrica do edifício através das faturas de energia fornecidas pela administração do edifício. No ano de 2017 foram consumidos 819.165 kWh de energia elétrica.

As faturas de energia elétrica para o edifício anexo não foram fornecidas, portanto, o consumo de energia elétrica do prédio anexo só será estimado após simulação computacional da situação atual do edifício.

7.3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO EDIFÍCIO

A Tabela (7.1) apresenta os resultados do levantamento das características gerais do edifício, que serão utilizadas na simulação computacional.

Tabela 7.1 - Características gerais do edifício

Característica	
Cidade de projeto	Brasília/DF
Temperatura Interna de Conforto	23° C
Umidade relativa do ar de operação	50 %
Quantidade de Pavimentos	27
Área total ocupada (m ²)	19050
Pé direito (m)	2,20
Volume total ocupado (m ³)	51270
População fixa (pessoas)	726
População flutuante (pessoas)	250
População total máxima (pessoas)	976
Horas de Funcionamento e ocupação (h)	10
Quantidade de entradas principais e secundárias	10
Atividade predominante exercida	Escritório (sedentária)

7.3.3 CARACTERÍSTICAS DA ENVOLTÓRIA

As características da envoltória foram discutidas em detalhes na seção 6.4 do capítulo do estudo de caso. A Tabela (7.2) apresenta um resumo das características analisadas.

Tabela 7.2 - Características da envoltória

Elemento Construtivo	U [W/(m ² K)]	CT [kJ/mK]	Condutividade Térmica (W/mK)
Parede Simples	1,85	161	--
Laje Pré-moldada	2,95	167	--
Cobertura Metálica sobre laje pré-moldada	1,82	169	--
Vidro simples	4,41	--	1,00

7.3.4 CARACTERÍSTICAS DA ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

As características de iluminação foram discutidas com detalhes na seção 6.5 do capítulo do estudo de caso. Como não foi possível fazer um levantamento das quantidades exatas de lâmpadas e quais tipos são usados nas salas comerciais, devido a dificuldade de acesso a esses locais, e para facilidade de cálculo, uma aproximação foi realizada, considerando que todas as lâmpadas usadas no edifício são lâmpadas fluorescentes tubulares, como mostrado na Fig. (6.13).

A Tabela (7.3) apresenta um resumo das características de iluminação e equipamentos elétricos analisados.

Tabela 7.3 - Características de iluminação

Elemento de Iluminação	Quantidade
Lâmpadas Fluorescentes Tubulares	10710
Luminárias	2678
Potência por lâmpada (W)	
	20
Potência total instalada (W)	
	214200
Carga de iluminação (W/m²)	
	10,6563
Equipamentos Elétricos	
Potência total instalada (W)	
	72360

7.3.5 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

As características do sistema de ar condicionado foram discutidas em detalhes na seção 6.6 do capítulo do estudo de caso. As unidades evaporadoras possuem potência de 2TR cada, sendo que das 280 espalhadas pelo edifício, 20 estão presentes no edifício anexo, as restantes encontram-se no edifício principal.

A Tabela (7.4) apresenta um resumo das características analisadas.

Tabela 7.4 - Características do sistema de ar condicionado

Elemento do Ar Condicionado	Quantidade
Chiller com condensação a água e expansão indireta de água gelada (140 TR)	4
Torres de Resfriamento	3
Consumo de água (m ³)	4044,19
Bombas de Água Gelada	5
Bombas de Água de Condensação	5
Motores elétricos	10
Unidades evaporadoras (2 TR)	280

7.3.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SITUAÇÃO ATUAL DO EDIFÍCIO

Primeiramente o edifício como um todo teve que ser modelado, com o auxílio do software *SketchUp*. Esse software permite que todas as características do edifício sejam fielmente descritas, como área ocupada, quantidade de pavimentos, janelas, vidraças, fachadas, paredes internas e externas, telhados, divisão do edifício em diferentes zonas térmicas, entre diversos outros parâmetros utilizados para modelagem. Tanto o edifício principal quanto o anexo foram modelados.

A Figura (7.1) mostra a área de trabalho do software utilizado e a Fig. (7.2) apresenta o modelo final do edifício para uso nas simulações computacionais.

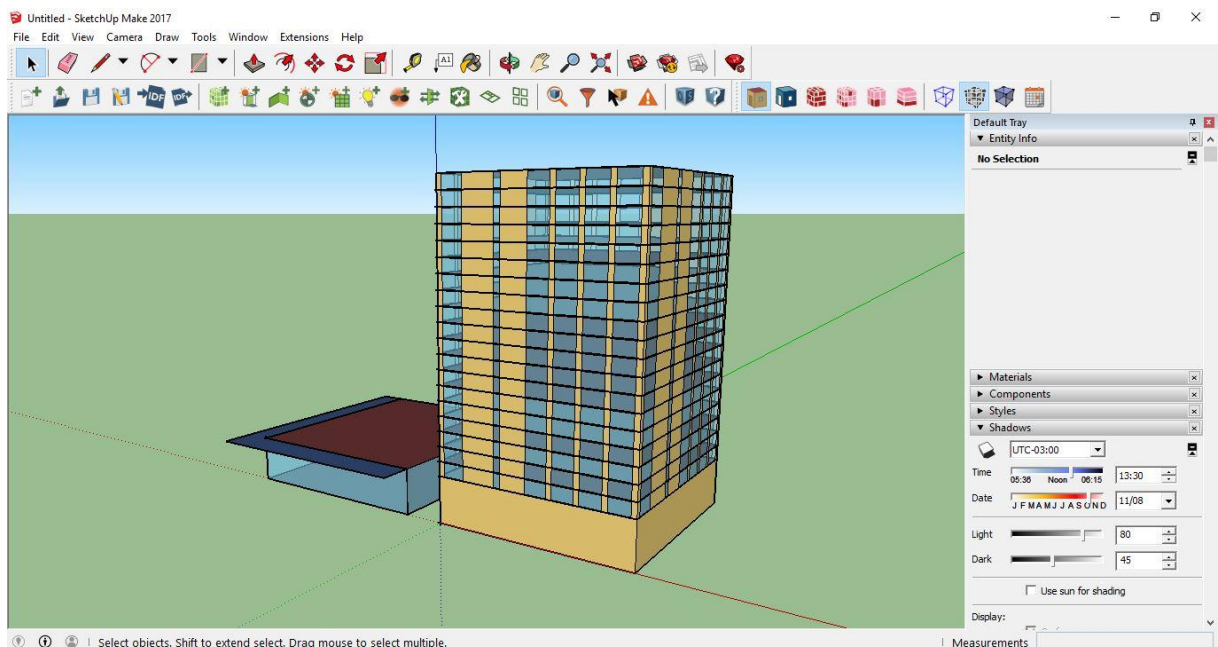


Figura 7.1 - Área de trabalho do software SketchUp

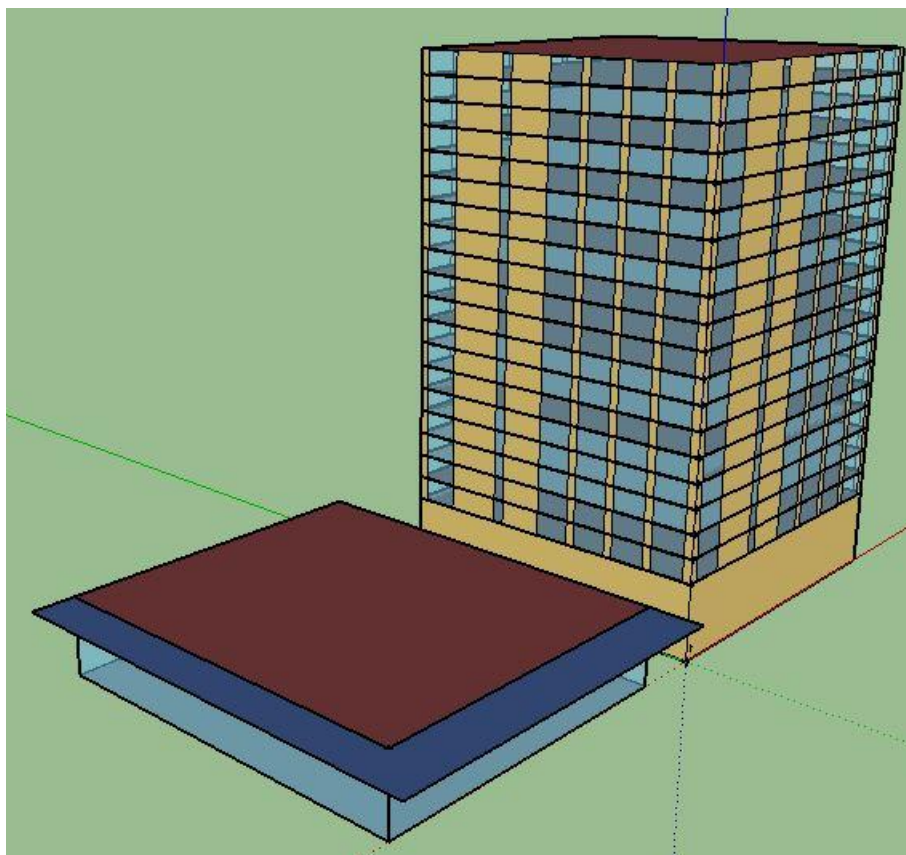


Figura 7.2 - Modelo do edifício Brasília Trade Center

Em seguida, o modelo é exportado para o software *OpenStudio*, aonde as características de envoltória, iluminação e sistema de ar condicionado são acrescentados, como potência de iluminação por área, potência dos equipamentos elétricos, rotina de ocupação do edifício, rotinas de iluminação, uso do sistema de climatização, potência de climatização, entre diversos outros parâmetros. Essa etapa da simulação é trabalhosa e complexa, devido ao fato de que centenas de parâmetros devem ser inseridos no software para que uma simulação computacional correta seja realizada.

O resultado da simulação computacional do edifício é apresentada em forma de relatório, gerado pelo próprio software, com todas as informações desejadas para avaliar a eficiência energética do edifício.

Os resultados principais desejados são o perfil de consumo energético e a carga térmica do edifício, esses resultados serão discutidos a seguir.

7.3.7 SIMULAÇÃO – PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO

Após a simulação, o valor de consumo energético ao longo de um ano foi retirado do relatório e comparado com o valor calculado através das faturas de energia elétrica. A Tabela (7.5) compara os resultados obtidos.

Tabela 7.5 - Consumo energético anual

Consumo Energético	kWh/ano
Calculado pelas faturas	819165
Simulado computacionalmente	1264208
Diferença	54,33%
Consumo energético do edifício anexo	445043

A diferença entre os valores de consumo calculados através das faturas de energia, apenas para o edifício principal, e o valor simulado computacionalmente, para os dois edifícios, foi de 445.043 kWh. Concluí-se então que esse valor corresponde ao consumo anual do edifício anexo.

O índice de consumo energético (ICE) para a situação atual é de:

$$ICE = 66,36 \frac{kWh}{m^2 ano}$$

A Tabela (7.6) mostra a contribuição dos sistemas de iluminação, equipamentos elétricos e climatização no consumo anual do edifício.

Tabela 7.6 - Contribuição dos sistemas de iluminação, equipamentos e climatização

	kWh/ano	%
Consumo energético total	1264208	--
Climatização	325630	26%
Iluminação	542975	43%
Equipamentos elétricos	232436	18%
		87%

É possível concluir que o maior contribuinte para o consumo energético do edifício é o sistema de iluminação, responsável por 43% do consumo total, seguido pelos equipamentos elétricos e climatização, com 26% e 18% respectivamente. Só esses três sistemas são responsáveis por 87% do consumo energético do edifício, o que comprova a necessidade de alternativas mais eficientes energeticamente para que o consumo do edifício como um todo diminua.

A Figura (7.3) ilustra o perfil de consumo energético do edifício ao longo do ano.

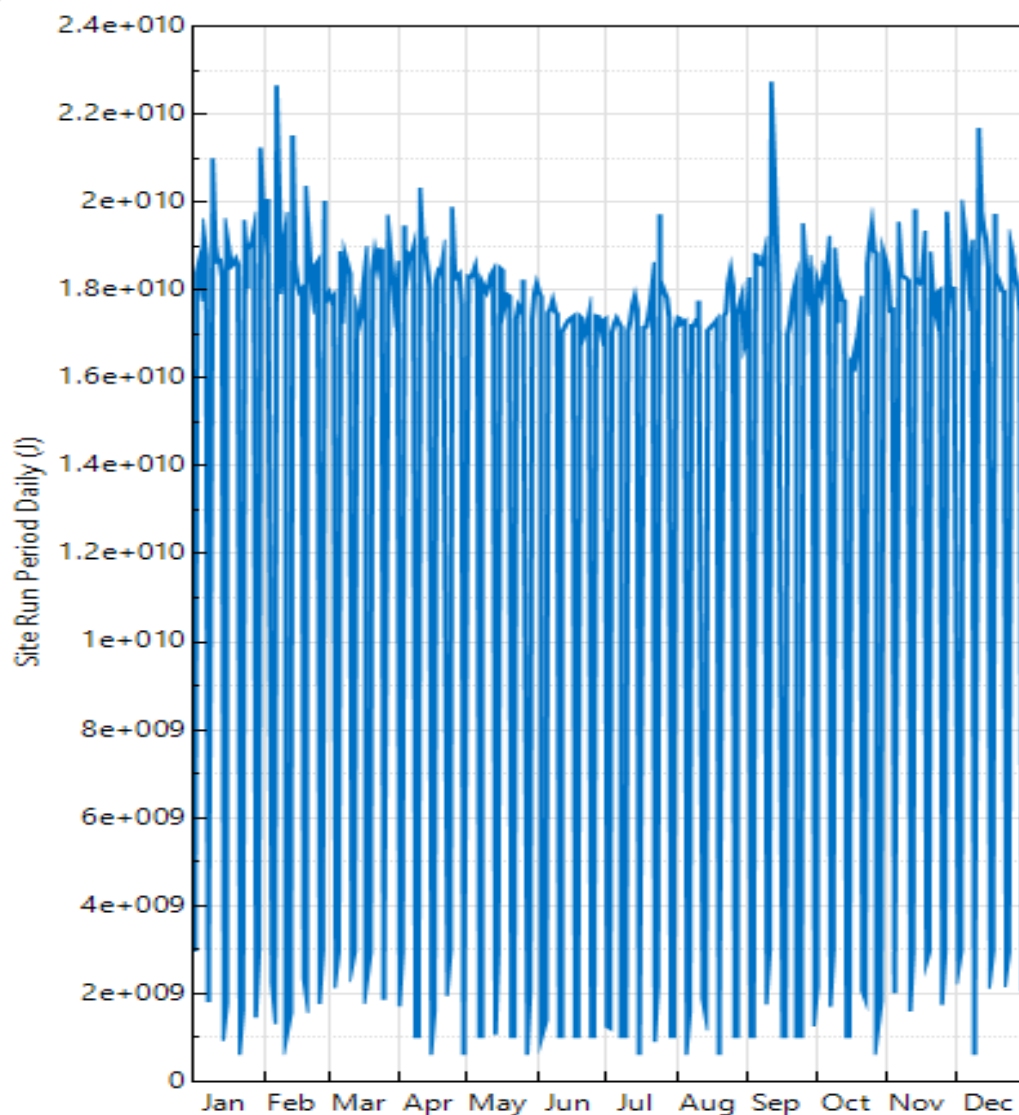


Figura 7.3 - Consumo energético ao longo do ano

7.3.8 SIMULAÇÃO – CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA

Para calcular a carga térmica do edifício, ainda é necessário caracterizar a cidade do projeto e o perfil de ocupação.

A cidade de projeto escolhida é Brasília – DF, as Fig. (7.4) e (7.5) representam o perfil de temperatura de bulbo seco e o perfil de umidade relativa do ar para a cidade selecionada segundo um ano típico.

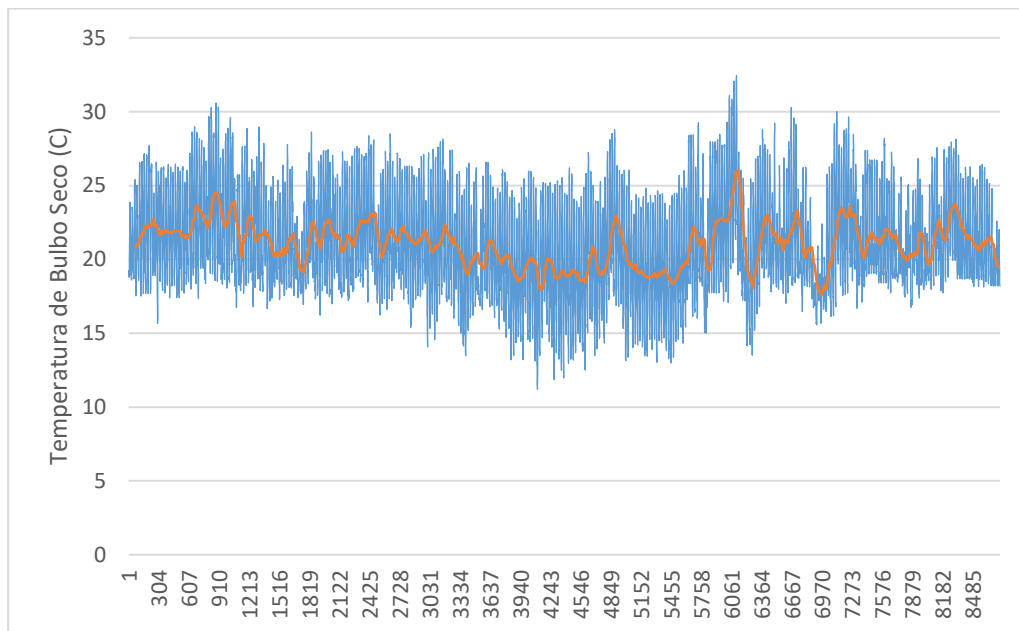


Figura 7.4 - Temperatura de bulbo seco para um ano em Brasília (CINTRA, 2018)

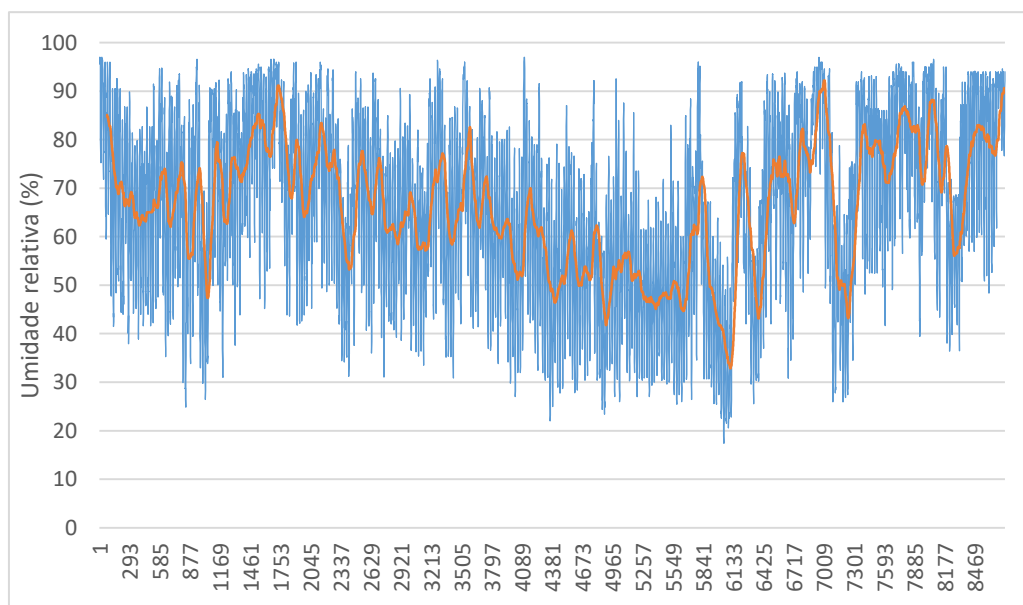


Figura 7.5 - Umidade relativa do ar para um ano em Brasília (CINTRA, 2018)

Como definido no item (7.3.2), a temperatura interna de conforto no edifício é de 23°C e umidade relativa do ar de 50%.

O perfil de ocupação do edifício foi desenhado dentro do software *OpenStudio* e considera um dia de trabalho com horário de funcionamento normal, com a ocupação quase máxima a partir de 8h da manhã, caindo para metade durante as 2h de almoço, entre 12h e 14h e novamente ocupação quase máxima após esse horário. A ocupação decai gradativamente a partir das 16h, considerando os diferentes horários de saída dos ocupantes do edifício, até aproximadamente 22h, na qual a ocupação do edifício é quase 0. A Figura (7.6) apresenta o perfil de ocupação do edifício para um dia normal de trabalho.



Figura 7.6 - Perfil de ocupação do edifício para um dia de trabalho

Com todas essas informações é possível calcular a carga térmica do edifício e seu perfil. A carga térmica total de climatização para o edifício é de 251 TR.

As Figuras (7.7) e (7.8) ilustram a variação de carga térmica ao longo do ano e ao longo de uma semana, respectivamente.

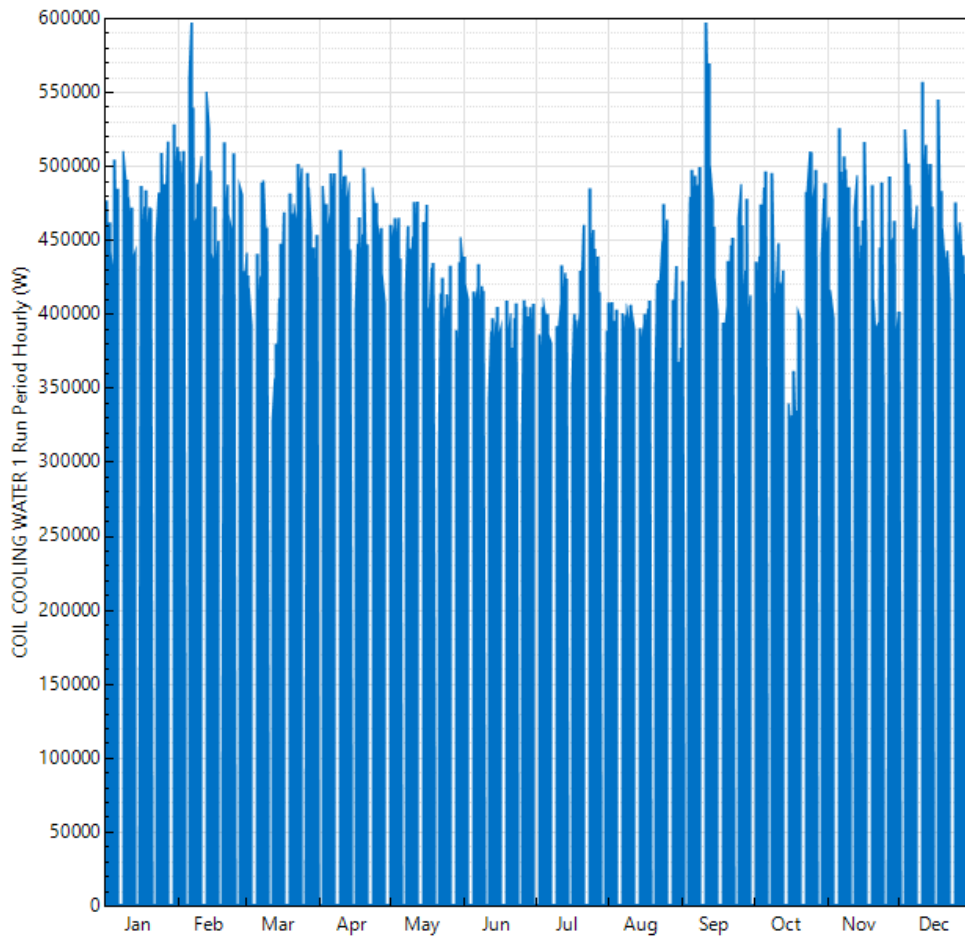


Figura 7.7 - Perfil de carga térmica ao longo de um ano

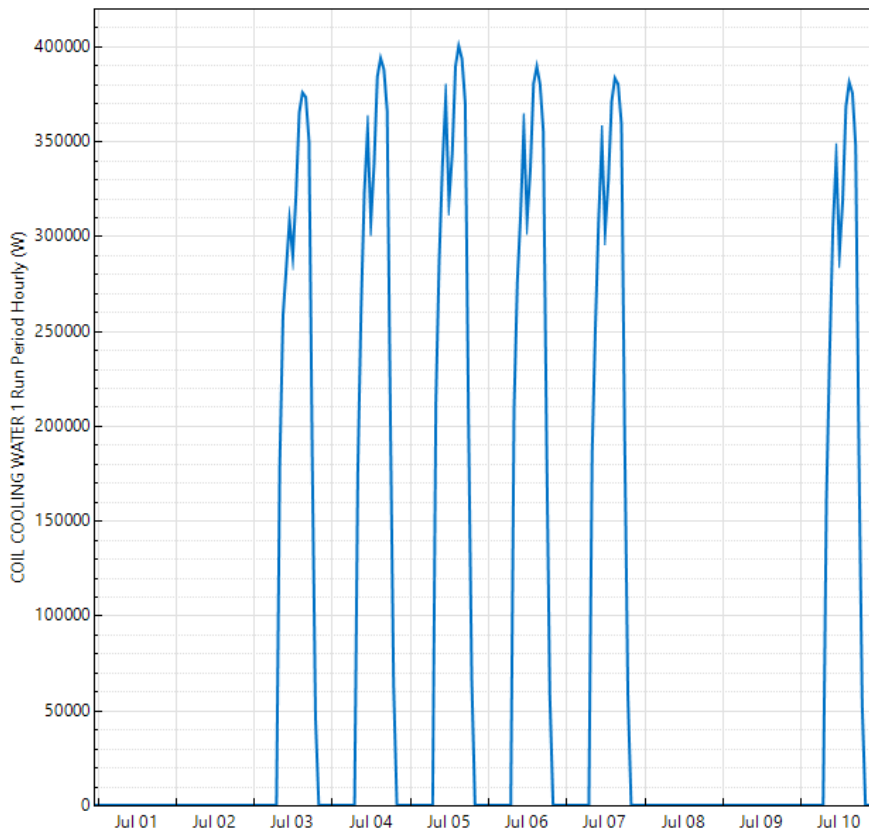


Figura 7.8 - Perfil de carga térmica semanal

7.4 2ª ETAPA: PROPOSTAS DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

7.4.1 OTIMIZAÇÃO

A primeira fase da otimização é definir o objetivo, como já citado no item 5.5.1 do capítulo de metodologia, o objetivo para se atingir o balanço energético em edifícios é de minimizar o índice de consumo energético (ICE), logo:

$$\text{OBJETIVO} \rightarrow \text{DIMINUIR ÍNDICE DE CONSUMO ENERGÉTICO} \rightarrow \text{MINIMIZAR} \rightarrow \frac{kWh}{m^2 \text{ano}}$$

A segunda fase é verificar se os requisitos mínimos definidos pelas restrições do item 5.5.1 da metodologia estão sendo respeitados, portanto, nessa etapa deve-se realizar a verificação.

- ORÇAMENTO

Já definido nos itens (7.1) e (7.2), o orçamento disponível para o estudo de caso é suficiente para realizar todas as intervenções necessárias para o edifício atingir o balanço energético quase nulo. Logo, essa restrição é obedecida.

- CARGA TÉRMICA

A carga térmica foi calculada pelo item (7.3.8) em 251 TR para a situação atual do edifício. Uma nova carga térmica pode ser obtida após a simulação computacional com as propostas de eficiência energética implementadas. Com isso, a carga térmica mínima exigida para a seleção de um novo sistema de climatização passa a ser a menor dentre as duas simulações. Assim, essa restrição também é obedecida.

- CONFORTO TÉRMICO E QUALIDADE DO AR

Como definido no item (7.3.2), a temperatura interna de conforto é de 23° C e umidade relativa do ar de 50%. Esses valores estão entre os limites de operação fixados pela norma NBR 16401-2 tanto para o verão quanto para o inverno.

Na questão de qualidade do ar interior, a vazão de ar exterior deve ser calculada segundo a Eq. (8). Considerando na Tab. (5.1) Nível 1 para escritórios com com média densidade, e eficiência de distribuição de ar na zona igual a 1, tem-se que a vazão de ar exterior utilizado durante a ventilação deve ser de 8155 L/s. Esse parâmetro é utilizado na simulação computacional através do perfil de ocupação. Portanto, essa restrição também é obedecida.

- CONFORTO AMBIENTAL

Para verificar se o nível de ruído das áreas comuns do edifício está entre 30 e 50 dB, é necessário fazer uma medição local. Para efeito nesse estudo de caso, assume-se que o nível de ruído está dentro do limite permitido.

Da mesma forma que o nível de ruído, para verificar se a iluminação do edifício é adequada e está dentro dos limites, uma medição local deve ser realizada. Utilizando a aproximação discutida no item 5.5.1, a potência de iluminação por área é de 10,6563, que está dentro dos limites estipulado. Uma nova potência de iluminação por área pode ser obtida com a substituição das lâmpadas atuais por lâmpadas mais eficientes, como LED. Contudo, desde que a potência ainda esteja dentro do limite estipulado, essa restrição também é obedecida.

Com todas as restrições obedecidas, é possível passar para o próximo passo da metodologia. Caso contrário, deve-se adequar o edifício às restrições impostas para dar prosseguimento à metodologia.

7.4.2 PROPOSTAS DE CLIMATIZAÇÃO

Tendo em mente as restrições de conforto térmico, qualidade do ar e carga térmica mínima, analisou-se as alternativas de climatização da seção (4.4) e chegou-se a seguinte proposta:

1. Substituição dos 4 chiller atuais por 2 novos, de mesma tecnologia, mais eficientes energeticamente e com carga térmica a definir, obedecendo a restrição;
2. Substituição das 3 torres de resfriamento por 2 novas, de mesma tecnologia, mais eficientes e com capacidade de rejeição de calor condizente com o projeto;
3. Substituição dos motores elétricos utilizados nas bombas por modelos mais novos e de alto rendimento;
4. Manutenção das bombas de água gelada e de água de condensação, já que apresentam bom estado de conservação;
5. Manutenção das tubulações de água gelada e água de condensação, pois apresentam bom estado de conservação. A tubulações de água gelada foram substituídas na reforma de 2015;
6. Manutenção das unidades evaporadoras, devido ao seu funcionamento simples não é necessário efetuar sua troca, apenas a realização de manutenções periódicas é suficiente para manter sua eficiência.

Com essas intervenções propostas, as características do novo sistema de climatização são mostradas na Tab. (7.7)

Tabela 7.7 - Características do novo sistema de climatização

Elemento do Ar Condicionado	Quantidade
Chiller com condensação a água e expansão indireta de água gelada (125 TR)	2
Torres de Resfriamento	2
Bombas de Água Gelada	5
Bombas de Água de Condensação	5
Motores de alto rendimento	10
Unidades condensadoras (2 TR)	280

7.4.3 PROPOSTAS DE ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Após analisar as alternativas presentes na seção 4.3, as seguintes intervenções foram propostas:

1. Substituição de todas as lâmpadas fluorescentes tubulares atuais por lâmpadas LED;
2. Substituir todas as luminárias para suportar as novas lâmpadas LED;
3. Manutenção dos equipamentos elétricos utilizados no edifício.

As novas características do novo sistema de iluminação e equipamentos elétricos são mostradas na Tab. (7.8).

Tabela 7.8 - Características do novo sistema de iluminação e equipamentos

Elemento de Iluminação	Quantidade
Lâmpadas LED	11430
Luminárias	2858
Equipamentos Elétricos	
Potência por lâmpada (W)	10
Potência total instalada (W)	114300
Carga de iluminação (W/m²)	6,0
Potência total instalada (W)	72360

7.4.4 PROPOSTAS DE ENVOLTÓRIA

Como o edifício passou por uma reforma de fachada em 2015, propôr uma renovação completa na envoltória não é cabível. Considerando isso e pensando em uma intervenção que poderia trazer o

máximo de eficiência energética para o edifício sem precisar de outra intervenção tão grande, a seguinte proposta foi selecionada:

1. Substituição das janelas com vidros simples por janelas com vidro de camada dupla à vácuo.

As novas características da envoltória do edifício são mostradas na Tab. (7.9).

Tabela 7.9 - Características da nova envoltória proposta

Elemento Construtivo	U [W/(m ² K)]	CT [kJ/mK]	Condutividade Térmica (W/mK)
Parede Simples	1,85	161	--
Laje Pré-moldada	2,95	167	--
Cobertura Metálica sobre laje pré-moldada	1,82	169	--
Vidro camada dupla à vácuo	2,5079	--	0,568696

7.4.5 PROPOSTAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Como descrito no item (5.5.5), a introdução de um sistema de controle e automação para o edifício Brasília Trade Center é baseado na contratação de um projeto específico para o edifício, que definirá quais itens de instrumentação, válvulas de controle e atuadores, e sistemas de supervisão são necessários para que o sistema funcione em condições ótimas.

O custo estimado para a implantação de um sistema de controle é estimado considerando os itens descritos na seção (5.5.5). A Tabela (7.10) apresenta os itens necessários para um sistema de controle e automação.

Tabela 7.10 - Valores de implementação do sistema de automação e controle

Itens	Componentes
Instrumentação	Sensores de temperatura
	Sensores de pressão
	Sensores de vazão
	Válvulas de fluxo
	Pressostatos
	Alarmes
	Cabeamento
	Roteadores
Válvulas de controle e atuadores	Variadores de frequência
	Válvulas de balanceamento hidráulico
	Registros
	Válvulas de 2 vias
	Solenóides
Sistema de monitoramento	Software de gestão

7.4.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS SOLUÇÕES PROPOSTAS

O mesmo modelo utilizado na simulação computacional da situação atual do edifício, apresentado no item (7.3.6), foi utilizado para a simulação das novas soluções propostas.

Após exportar o modelo para o software *OpenStudio*, as novas características de envoltória, iluminação e climatização foram acrescentadas. Os novos resultados gerados são apresentados em um novo relatório, disponível para nova análise de eficiência energética do edifício.

Os novos perfis de consumo de energia elétrica e carga térmica são obtidos e apresentados a seguir.

7.4.7 SIMULAÇÃO – PERFIL DE CONSUMO ENERGÉTICO

Após a simulação, o novo valor de consumo energético ao longo de um ano foi retirado do relatório e comparado com o valor atual do edifício. A Tabela (7.11) compara os resultados obtidos.

Tabela 7.11 - Comparativo entre consumos de energia elétrica

Consumo Energético	kWh/ano
Atual	1264208
Soluções de Eficiência Energética	811641
Redução	35,80%

Concluí-se que as alternativas de melhoria de eficiência energética geram uma redução de 35,80% no consumo de energia elétrica do edifício.

A Tabela (7.12) mostra a contribuição dos sistemas de iluminação, equipamentos elétricos e climatização no consumo anual do edifício.

Tabela 7.12 - Contribuição do sistema de climatização, iluminação e equipamentos no novo consumo

	kWh/ano	%
Consumo energético total	811641	--
Climatização	174853	22%
Iluminação	305722	38%
Equipamentos elétricos	232436	29%
		88%

A Tabela (7.13) compara as reduções de consumo energético entre os sistemas de climatização, iluminação e equipamentos elétricos antes e depois das propostas de melhoria de eficiência energética.

Tabela 7.13 - Comparativo entre os maiores consumidores de energia elétrica

	kWh/ano			
	Antes	Depois	Redução	%
Climatização	325630	174853	150777	46,30%
Iluminação	542975	305722	237253	43,70%
Equipamentos elétricos	232436	232436	0	0,00%

É possível concluir que as propostas de melhoria de eficiência energética apresentaram resultados muito positivos, com 43,70% de redução no consumo original para o sistema de iluminação e 46,30% para o sistema de climatização, mesmo que estes ainda sejam responsáveis por 38% e 22% do consumo total do edifício, respectivamente.

O novo perfil de consumo energético do prédio é mostrado na Fig. (7.9).

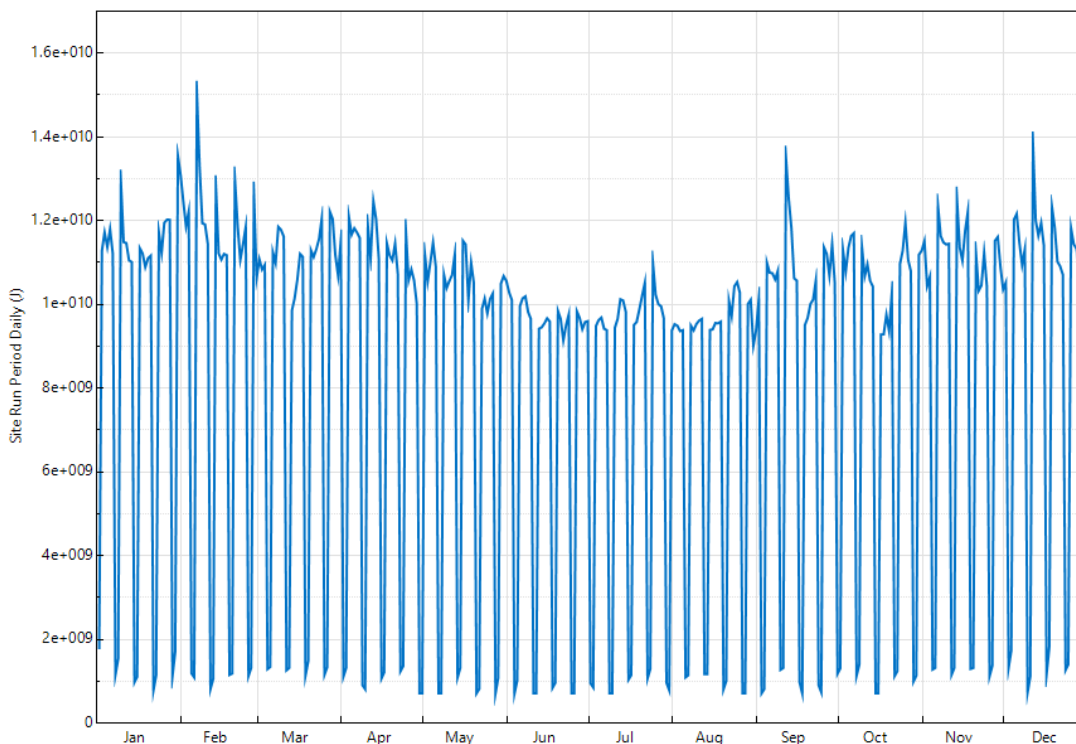


Figura 7.9 - Perfil de consumo energético para novas soluções de eficiência energética

7.4.8 SIMULAÇÃO – CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA

Mantendo a rotina de ocupação e os valores de temperatura interna de conforto e umidade relativa do ar do item (7.3.8), a nova carga térmica de climatização, resultado da substituição das lâmpadas LED e vidros de camada dupla, é de 202 TR. Com um consumo de água de 3.281 m³ de água por ano, uma redução de 19% no consumo de água anual.

A Tabela (7.14) apresenta um comparativo entre a carga térmica atual e a nova, após melhorias de eficiência energética do edifício.

Tabela 7.14 - Comparativo entre carga térmica atual e nova

Carga Térmica	TR
Atual	251
Nova	202
Redução	49
	19,52%

Portanto, a substituição das lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED e dos vidros simples por vidros de dupla camada resultam em uma redução da carga térmica de climatização do edifício de quase 20%.

As Figuras (7.10) e (7.11) apresentam o novo perfil de carga térmica anual e semanal, respectivamente.

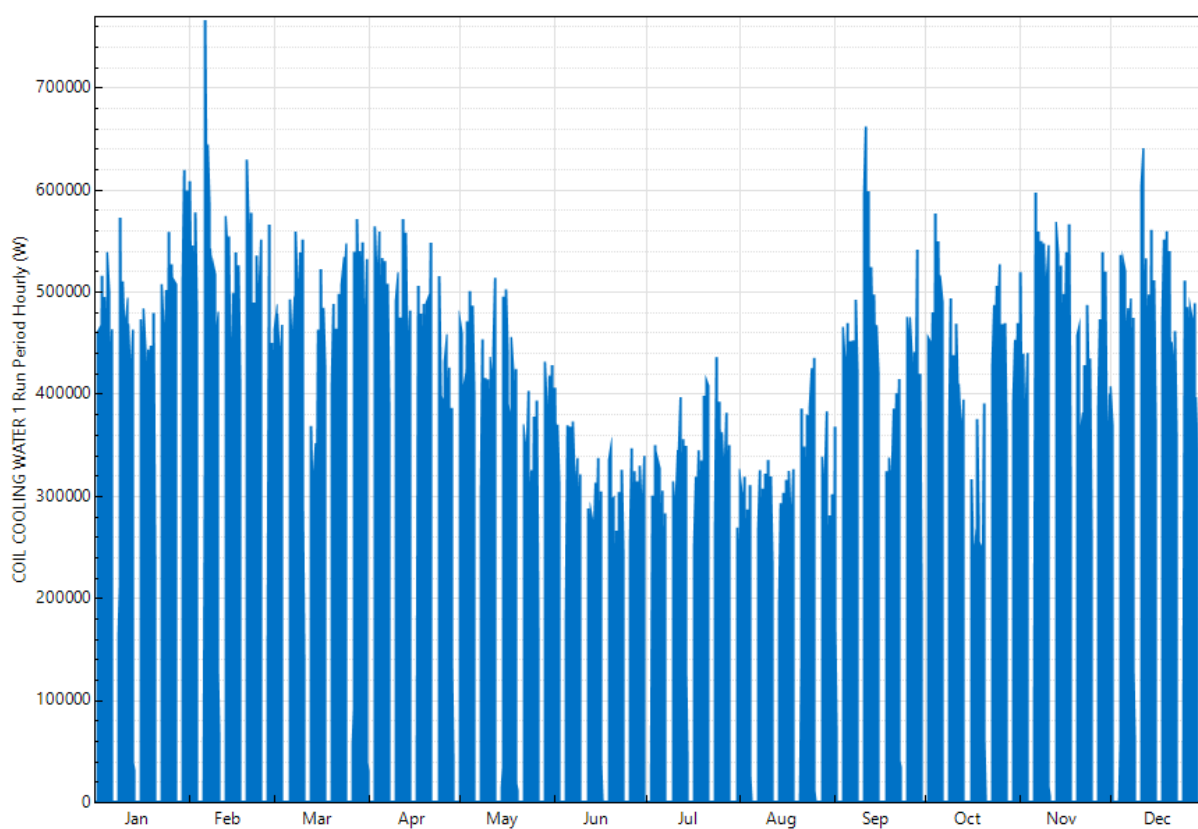


Figura 7.10 - Novo perfil de carga térmica anual

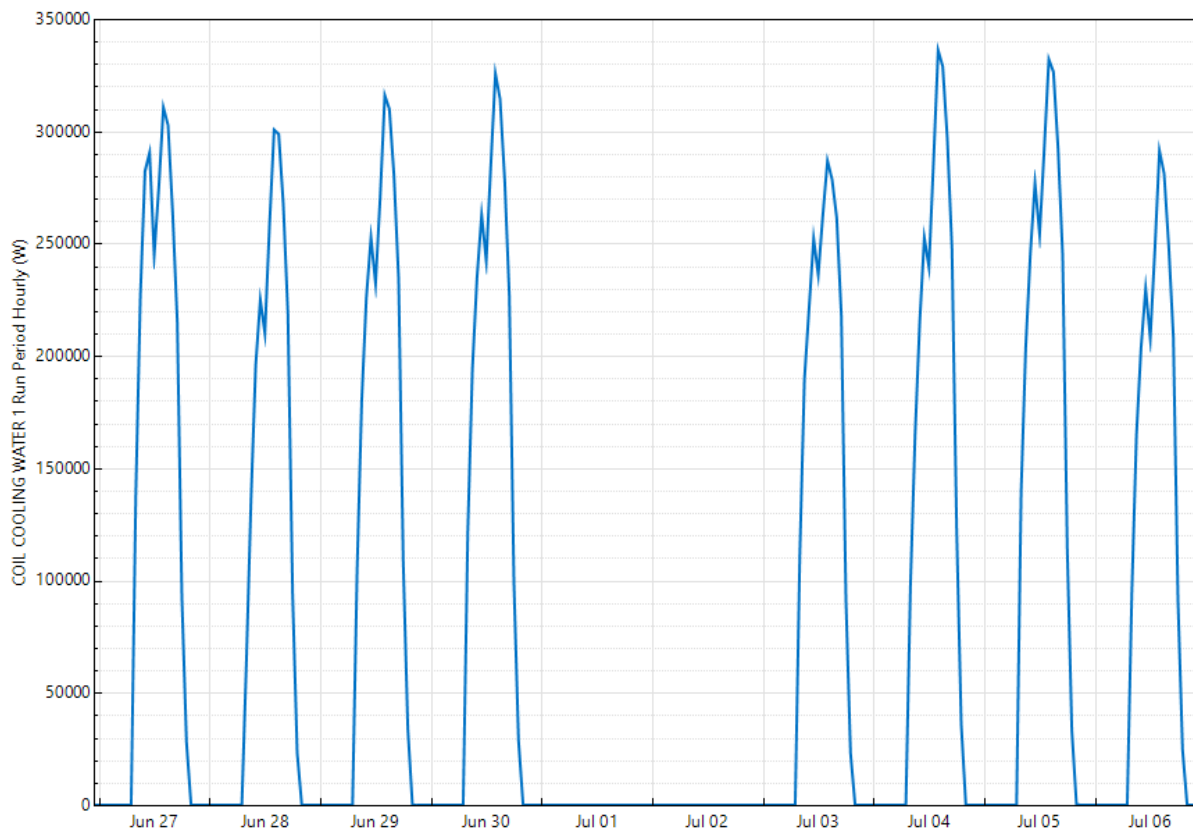


Figura 7.11 - Novo perfil de carga térmica semanal

7.5 3ª ETAPA: IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RENOVÁVEL

7.5.1 TIPO DE LIGAÇÃO DO EDIFÍCIO COM A REDE DE CONCESSIONÁRIA

O edifício Brasília Trade Center possui ligação direto com a rede da concessionária local. É preciso entrar em contato com a concessionária para alterar o contrato vigente, para incluir a possibilidade de crédito financeiro pela geração de energia elétrica *on-site* possível.

7.5.2 DISPONIBILIDADE PARA GERAÇÃO ON-SITE

Pelas Figuras (6.4) e (6.5) mostradas na seção (6.4.1), é possível fazer uma estimativa da área útil disponível para instalação de um sistema de painéis fotovoltaicos. Ignorando a área de laje pré-moldada no edifício principal, que já está ocupada com antenas, geradores, cabeamento, etc.

Portanto, considera-se a área com cobertura metálica no edifício principal e toda a área do edifício anexo, que atualmente é ocupado apenas por unidades condensadoras de sistemas de ar condicionado, que com a modernização do sistema poderão ser retiradas. Isso deixa uma área útil de aproximadamente

2.321m² para instalação dos painéis fotovoltaicos. Logo, há disponibilidade para geração *on-site*, podendo abrir mão de alternativas *off-site*.

7.5.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DE GERAÇÃO

Para a estimativa de capacidade de geração de energia renovável foi utilizado o software PVSyst. Graças a sua interface simples e intuitiva, é possível realizar a simulação de maneira fácil e rápida. Inclusive, há duas ferramentas de simulação, uma preliminar, que com poucos parâmetros já apresenta uma capacidade aproximada, e uma mais detalhada, que apresenta resultados mais próximos à realidade. No presente trabalho a simulação mais detalhada foi escolhida.

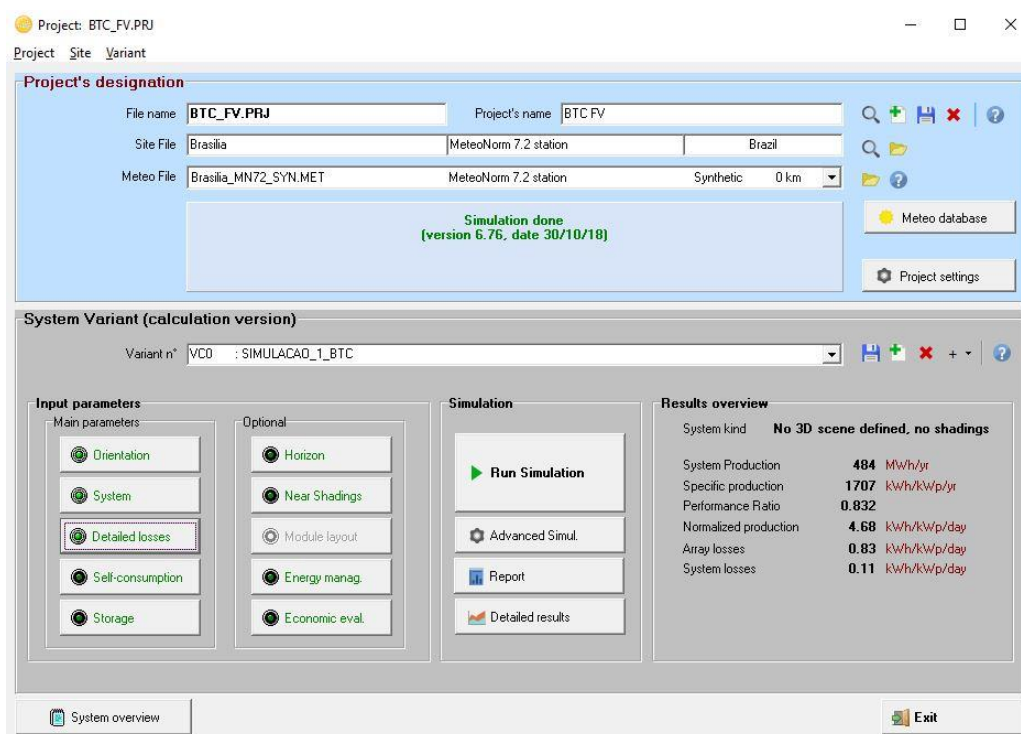


Figura 7.12 - Área de trabalho do software PVSyst

Primeiramente, a localização geográfica é necessária, o próprio software possui uma base de dados com diversas localizações, incluindo Brasília. Em seguida, a orientação dos módulos fotovoltaicos deve ser definida. Como base, a inclinação dos módulos deve ser igual à latitude do local de instalação, como a laje do edifício é plana, definiu-se a inclinação das placas como a latitude de Brasília, 16°. O ângulo de azimute foi considerado 0°, pois as placas serão orientadas para o norte geográfico.

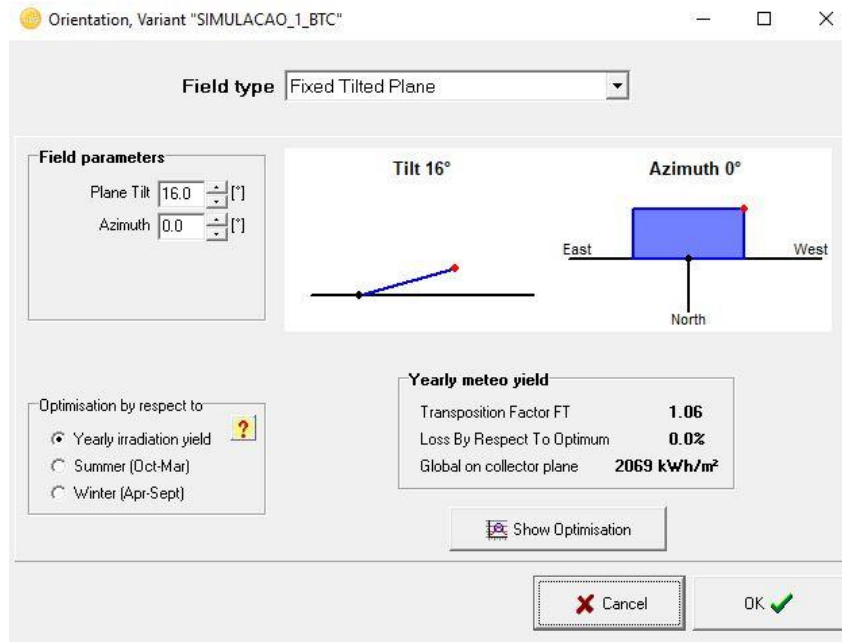


Figura 7.13 - Orientação dos módulos FV

As definições do sistema devem ser definidos em seguida, onde informações como área de telhado disponível para instalação, potência dos módulos fotovoltaicos, potência dos inversores e quantidades dos mesmos. O programa já apresenta um esquema de montagem ideal dos módulos para maior eficiência possível.

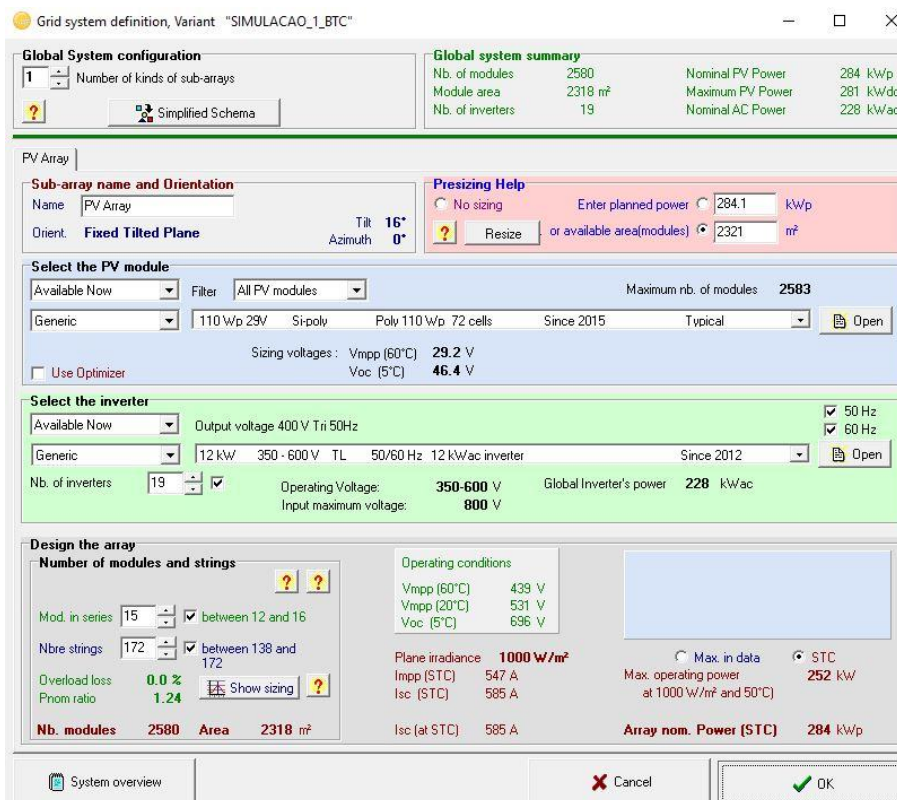


Figura 7.14 - Definições do sistema de módulos FV

Por último, as perdas relativas ao sistema, como perda de calor, perda ôhmica, qualidade dos módulos, entre outras são definidas, para que possam ser devidamente calculadas durante a simulação.

O resultado final da simulação é apresentado em forma de relatório, gerado pelo próprio software, com valores de energia elétrica gerada na saída dos módulos, energia elétrica injetada na rede, fatores de performance e perdas. A Tabela (7.15) apresenta os resultados calculados pela simulação computacional, todos os valores apresentados são calculados em base anual.

Tabela 7.15 - Resultados da simulação do sistema fotovoltaico

Área ocupada pelos módulos FV (m ²)	2.318
Quantidade de módulos instalados	2580
Quantidade de Inversores	19
Energia elétrica na saída dos módulos fotovoltaicos (kWh/ano)	496.020
Energia elétrica injetada na rede (kWh/ano)	484.430
Fator de Performance (PR)	0,832

Concluí-se que para uma área útil de 2.321m² disponível na cobertura do edifício, um total de 2.580 módulos fotovoltaicos podem ser instalados, conectados à 19 inversores de 12 kWac, gerando 484.430 kWh que são injetados na rede anualmente. Quantidade essa abatida pela concessionária como crédito na fatura de energia.

O consumo de energia elétrica do edifício resultante da melhoria de eficiência energética e sistema de geração de energia fotovoltaica é mostrado na Tab. (7.16).

Tabela 7.16 - Impacto da geração fotovoltaica no consumo de energia pós-intervenção

Consumo Energético	kWh/ano
Melhoria de Eficiência Energética	811641
Geração de Energia Renovável	484430
Consumo de Energia Elétrica Resultante	327211
Redução	59,69%

Comparando o consumo de energia elétrica antes das propostas de melhoria de eficiência energética com o consumo de energia elétrica resultante, temos que:

Tabela 7.17 - Comparação dos consumos energéticos pré e pós-intervenções

Consumo Energético	kWh/ano
Consumo de Energia Elétrica Atual	1264208
Consumo de Energia Elétrica Resultante	327211
Redução	74,12%

Portanto, a implementação das propostas de melhoria de eficiência energética de envoltória, iluminação e climatização, em conjunto com o sistema de geração de energia renovável fotovoltaica apresenta uma redução total de consumo energético, comparado ao atual, de 74,12%.

Os índices de consumo energético antes e depois das melhorias de eficiência energética e energia renovável são comparados na Tab. (7.18).

Tabela 7.18 - Comparativo dos índices de consumo energético

Índice de Consumo Energético (ICE)	kWh/m ² .ano
Atual	66,36
Pós melhorias de eficiência energética	17,18
Redução	74,12%

7.6 4ª ETAPA: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

7.6.1 CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO INICIAIS

A Tabela (7.19) detalha os custos de cada equipamento envolvido no projeto e o custo relacionado à obra para instalação dos mesmos.

Tabela 7.19 - Custos iniciais de implementação

Alternativa	Item	Componente	Quantidade	Custo unitário	Custo do item
Climatização	1	Chiller de compressão a vapor com condensação a água, capacidade 125 TR	2	R\$ 287.000,00	R\$ 574.000
	2	Torre de resfriamento de fluxo forçado	2	R\$ 60.000,00	R\$ 120.000
	3	Motores elétricos de alto desempenho.	10	R\$ 2.550,00	R\$ 25.500
Iluminação	4	Lâmpadas LED (10W)	11430	R\$ 8,79	R\$ 100.493
	5	Luminárias LED	2858	R\$ 39,92	R\$ 114.091
Envoltória	6	Vidro duplo insulado (m2)	3479	R\$ 160,00	R\$ 556.640
Controle e Automação	7	Instrumentação	1	R\$ 46.750,00	R\$ 46.750,00
	8	Válvulas de controle e atuadores	1	R\$ 72.250,00	R\$ 72.250,00
	9	Sistema de supervisão	1	R\$ 29.750,00	R\$ 29.750,00
Energia Renovável	12	Painel Fotovoltaico	2580	R\$ 318,75	R\$ 822.375
	13	Suporte Metálico	2580	R\$ 77,60	R\$ 200.208
	14	Inversores 12 kWac	19	R\$ 17.586,50	R\$ 334.144
	15	Obra de instalação .	-	-	R\$ 2.115.600
				Custo Inicial	R\$ 5.111.800

7.6.2 CUSTOS OPERACIONAIS

A Tabela (7.20) detalha os custos operacionais para um ano de operação do edifício com as propostas de melhoria e energia renovável implementadas.

Tabela 7.20 - Custos Operacionais

Item	Componente	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Custo do item
1	Consumo de Energia Anual	kWh	327211	R\$ 0,55	R\$ 179.966
2	Consumo de Água Anual	m ³	3281	R\$ 12,37	R\$ 40.586
3	Tratamento Químico da Água de Condensação	m ³	3281	R\$ 12,37	R\$ 40.586
4	Manutenção Sistema de Climatização	R\$/TR	202	R\$ 495,05	R\$ 100.000
5	Manutenção Sistema de Iluminação	R\$/W	114300	R\$ 0,09	R\$ 10.287
6	Manutenção Envolória	R\$/m ²	3479	R\$ 8,00	R\$ 27.832
7	Manutenção Sistema de Controle e Automação	-	1	R\$ 20.000,00	R\$ 20.000,00
8	Manutenção Sistema de Geração Renovável	R\$/kWh	484430	R\$ 0,03	R\$ 14.532,90
				Custo Operacional	R\$ 433.790

Para o cálculo do valor do consumo de energia elétrica anual, foi utilizada a tarifa de energia da concessionária de Brasília, local do edifício, de R\$0,55/kWh. Para o consumo de água anual, foi utilizada a tarifa da CAESB, companhia de saneamento e abastecimento de Brasília, no valor de R\$12,37/m³ de água para edifícios comerciais e públicos.

Para a estimativa de custos de manutenção, foram definidas porcentagens dos custos iniciais. Para o sistema de climatização, definiu-se o custo de manutenção como 14% do custo inicial dos equipamentos de climatização. Analogamente, para o sistema de iluminação, envoltória, controle e automação e sistema de geração renovável, o custo de manutenção foi definido como 5%, 5%, 13% e 1% dos custos iniciais para cada sistema, respectivamente.

7.6.3 DEFINIÇÃO DA TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE

A taxa mínima de atratividade para o estudo de caso em questão é definida como a taxa de juros SELIC referente ao ano de 2018, no valor de 6,50% ao ano.

$$i = 6,50\% \text{ a. a}$$

7.6.4 PAYBACK

Para que o cálculo do *payback* seja realizado corretamente, primeiramente deve-se definir as saídas e entradas, ou despesas e receitas, para que o fluxo de caixa de cada ano seja calculado.

As despesas são definidas como os custos iniciais e operacionais, sendo que o custo inicial de implementação é aplicado somente no primeiro ano de cálculo, e os custos operacionais são aplicados a todos os anos restantes, já que representa o custo para manter o edifício operando em condições ótimas.

As receitas foram divididas em duas partes: a primeira se trata do valor correspondente à economia de consumo de energia elétrica após as melhorias de eficiência energética e energia renovável. Como esse valor não é mais utilizado para pagar a fatura de energia elétrica, foi considerada como uma receita.

A segunda se trata de uma porcentagem da taxa de condomínio das salas comerciais alugadas pelo edifício, bem como a taxa de administração de condomínio da área ocupada pela agência bancária atualmente. Como descrito na seção (6.1), o edifício principal possui 308 salas comerciais disponíveis para aluguel, após consulta com a administração do condomínio, estimou-se o valor da taxa de condomínio mensal em R\$465,00 por sala. Assumindo que 25% desse valor é utilizado para cobrir os custos operacionais do edifício, tem-se uma receita anual de R\$429.660 referente à taxa de administração de condomínio.

A Tabela (7.21) apresenta os valores de saídas e entradas.

Tabela 7.21 - Despesas e Receitas para o Edifício BTC

DESPESAS	
Custo inicial de implementação	R\$ 5.111.800,00
Custos operacionais anuais	R\$ 433.790,00
RECEITAS	
Economia de energia	R\$ 515.348,00
25% da taxa de condomínio	R\$ 429.660,00

Com as receitas e despesas definidas, o *payback* pode ser calculado. A Figura (7.15) e a Tabela (7.22) apresentam os resultados para o *payback*.

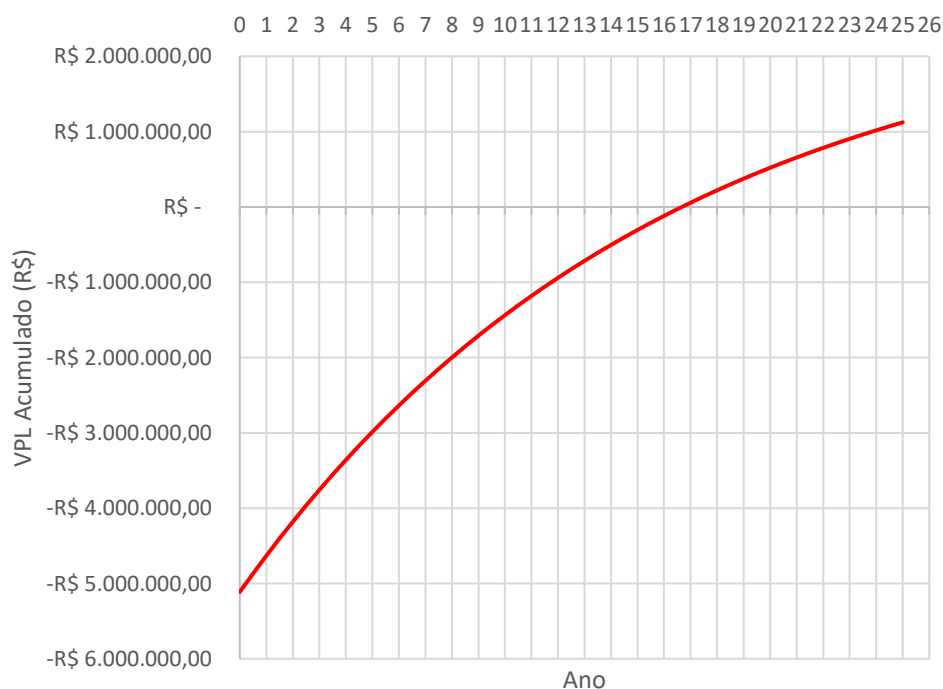


Figura 7.15 - Fluxo de caixa descontado para o edifício BTC

Tabela 7.22 - Fluxo de caixa para o edifício BTC

Ano	CAIXA (R\$)		i = 6,50% ao ano		
	SAÍDAS	ENTRADAS	Fluxo de caixa (FC)	VP dos termos do FC	VPL acumulado
0	R\$ 5.111.800,00		-R\$ 5.111.800,00	-R\$ 5.111.800,00	-R\$ 5.111.800,00
1	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 480.016,90	-R\$ 4.631.783,10
2	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 450.720,10	-R\$ 4.181.063,00
3	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 423.211,36	-R\$ 3.757.851,65
4	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 397.381,56	-R\$ 3.360.470,09
5	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 373.128,22	-R\$ 2.987.341,87
6	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 350.355,14	-R\$ 2.636.986,73
7	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 328.971,96	-R\$ 2.308.014,77
8	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 308.893,86	-R\$ 1.999.120,91
9	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 290.041,18	-R\$ 1.709.079,73
10	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 272.339,14	-R\$ 1.436.740,59
11	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 255.717,50	-R\$ 1.181.023,09
12	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 240.110,33	-R\$ 940.912,76
13	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 225.455,71	-R\$ 715.457,05
14	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 211.695,50	-R\$ 503.761,55
15	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 198.775,12	-R\$ 304.986,43
16	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 186.643,30	-R\$ 118.343,13
17	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 175.251,93	R\$ 56.908,80
18	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 164.555,80	R\$ 221.464,60
19	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 154.512,49	R\$ 375.977,09
20	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 145.082,15	R\$ 521.059,24
21	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 136.227,37	R\$ 657.286,61
22	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 127.913,02	R\$ 785.199,63
23	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 120.106,13	R\$ 905.305,76
24	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 112.775,70	R\$ 1.018.081,46
25	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 105.892,68	R\$ 1.123.974,14
	R\$ 15.956.550,00	R\$ 23.625.200,00	R\$ 7.668.650,00	R\$ 1.123.974,14	VPL do Projeto

Analisando a Tabela (7.22), concluí-se que o tempo necessário para que o valor presente líquido (VPL) deixa de ser negativo para se tornar positivo é entre o 16º e o 17º ano. O mesmo pode ser observado pela Fig. (7.15) pelo ponto de interseção dos eixos de VPL acumulado e ano, também entre o 16º e o 17º ano.

Portanto, concluí-se que o tempo de retorno do investimento inicial para que as receitas do edifício sejam maiores que as despesas é de 17 anos.

7.6.4 TAXA DE RENTABILIDADE E ÍNDICE DE LUCRATIVIDADE

A taxa de rentabilidade do projeto é calculada pela Eq. (4), considerando o VPL calculado no item (7.6.3) e os VP das entradas e saídas do fluxo de caixa. A Tabela (7.23) apresenta os valores presentes.

Tabela 7.23 - Valores Presentes líquido, das saídas e das entradas do fluxo de caixa

Ano	CAIXA (R\$)		i = 6,50% ao ano			
	SAÍDAS	ENTRADAS	Fluxo de caixa (FC)	VP SAÍDAS	VP ENTRADAS	VPL
0	R\$ 5.111.800,00		-R\$ 5.111.800,00	R\$ 5.111.800,00	R\$ -	-R\$ 5.111.800,00
1	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 407.314,55	R\$ 887.331,46	R\$ 480.016,90
2	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 382.454,98	R\$ 833.175,08	R\$ 450.720,10
3	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 359.112,66	R\$ 782.324,01	R\$ 423.211,36
4	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 337.194,98	R\$ 734.576,54	R\$ 397.381,56
5	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 316.615,01	R\$ 689.743,23	R\$ 373.128,22
6	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 297.291,09	R\$ 647.646,22	R\$ 350.355,14
7	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 279.146,56	R\$ 608.118,52	R\$ 328.971,96
8	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 262.109,45	R\$ 571.003,31	R\$ 308.893,86
9	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 246.112,16	R\$ 536.153,34	R\$ 290.041,18
10	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 231.091,23	R\$ 503.430,37	R\$ 272.339,14
11	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 216.987,07	R\$ 472.704,57	R\$ 255.717,50
12	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 203.743,73	R\$ 443.854,05	R\$ 240.110,33
13	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 191.308,66	R\$ 416.764,37	R\$ 225.455,71
14	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 179.632,55	R\$ 391.328,05	R\$ 211.695,50
15	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 168.669,06	R\$ 367.444,18	R\$ 198.775,12
16	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 158.374,70	R\$ 345.018,01	R\$ 186.643,30
17	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 148.708,64	R\$ 323.960,57	R\$ 175.251,93
18	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 139.632,53	R\$ 304.188,33	R\$ 164.555,80
19	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 131.110,35	R\$ 285.622,84	R\$ 154.512,49
20	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 123.108,31	R\$ 268.190,46	R\$ 145.082,15
21	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 115.594,66	R\$ 251.822,03	R\$ 136.227,37
22	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 108.539,59	R\$ 236.452,61	R\$ 127.913,02
23	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 101.915,11	R\$ 222.021,23	R\$ 120.106,13
24	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 95.694,93	R\$ 208.470,64	R\$ 112.775,70
25	R\$ 433.790,00	R\$ 945.008,00	R\$ 511.218,00	R\$ 89.854,40	R\$ 195.747,08	R\$ 105.892,68
	R\$ 15.956.550,00	R\$ 23.625.200,00	R\$ 7.668.650,00	R\$ 10.403.116,94	R\$ 11.527.091,09	R\$ 1.123.974,14

Logo, a taxa de rentabilidade é a razão entre o valor presente líquido e o valor presente das saídas do fluxo de caixa.

$$TR = \frac{1123974,14}{10403116,94} = 0,108 = 10,8\%$$

Para saber o índice de lucratividade do projeto, basta somar 1 ao valor de taxa de rentabilidade. Logo,

$$IL = 1 + 0,108 = 1,108$$

7.6.5 RESULTADOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A Tabela (7.24) apresenta o resumo da análise de viabilidade econômica para o projeto do edifício Brasília Trade Center.

Tabela 7.24 - Resultados de viabilidade econômica

Taxa Mínima de Atratividade	6,5% a.a
Payback	17 anos
Taxa de Rentabilidade	10,8%
Índice de Lucratividade	110,8%

Em seguida uma interpretação dos resultados apresentados é feita para facilitar o entendimento dos parâmetros calculados:

- A taxa mínima de atratividade de 6,5% ao ano foi baseada na taxa de juros SELIC, usada como base para rentabilidade mínima aceitável de financiamento para grandes projetos. Conclui-se que a taxa adotada para o projeto é financeiramente interessante para investidores em potencial;
- O *payback* do projeto de atingir o balanço energético quase-nulo no edifício BTC é de 17 anos, que pode ser considerado um número muito alto. Mas quando se leva em consideração que a vida útil dos sistemas adotados no edifício é de 25 anos, exceto para lâmpadas, esse número se torna atrativo, já que o edifício poderá usufruir dos resultados do projeto por quase uma década, antes que seja necessário realizar uma nova intervenção;
- Um investimento é considerado financeiramente atrativo quando o índice de lucratividade é maior que 1, ou 100%. O índice para o projeto do edifício BTC é de 110,8 %, isso significa que para cada R\$1,00 investido, o retorno será de R\$1,11.

8. CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

8.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia para transformar edifícios comerciais, altos, com grande número de pavimentos, climatizados artificialmente e sem ventilação natural nZEB.

Em sua primeira parte, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica e conceitual, introduzindo o leitor à importância de edifícios com alta eficiência energética e porque deve-se melhorar a eficiência de edifícios existentes. Em seguida, o conceito de balanço energético nulo e quase nulo foi definido, acompanhado de uma descrição do que é necessário para que esse balanço seja atingido.

Posteriormente foram introduzidos conceitos de engenharia econômica, que foram utilizados na análise de viabilidade econômica, presente na metodologia. Em seguida, diversas estratégias para melhorar a eficiência energética de um edifício foram apresentadas, divididas em envoltória, iluminação, climatização e finalmente geração de energia elétrica renovável.

Finalmente, a metodologia foi desenvolvida, onde foram definidos diferentes níveis de aumento de eficiência energética a serem atingidos, bem como critérios básicos para que o balanço energético nulo seja atingido. Em seguida, as quatro etapas principais da metodologia são desenvolvidas. A primeira é a análise da situação atual do edifício, finalizada com uma simulação computacional para estimar o consumo de energia elétrica e a carga térmica do edifício. A segunda etapa é a de análise e seleção de estratégias de melhoria de eficiência energética para o edifício, novamente finalizada com uma nova simulação computacional com as estimativas dos novos consumo energético e carga térmica. A terceira etapa é a implementação de um sistema de geração de energia renovável, complementando o novo consumo de energia do edifício. E para finalizar a metodologia, uma análise de viabilidade econômica é realizada.

Em seguida, apresentou-se o estudo de caso, o edifício Brasília Trade Center e uma caracterização do edifício foi realizada, através de visitas técnicas e informações obtidas da administração do edifício.

Finalmente, a metodologia foi aplicada ao estudo de caso, em um passo-a-passo de todos os tópicos abordados na metodologia. A partir dos resultados, pode-se concluir que as estratégias adotadas geraram um grande aumento na eficiência energética do edifício, que juntamente com a geração de energia renovável *on-site* contribuíram para uma grande redução do consumo de energia elétrica do edifício como um todo.

- As estratégias de melhoria de eficiência energética apresentaram uma redução de 36% no consumo energético do edifício;
- A carga térmica de climatização do edifício foi reduzida de 251 TR para 202 TR, uma redução de 20% aproximadamente;
- A implementação do sistema de geração de energia renovável através de painéis fotovoltaicos, em conjunto com as estratégias de melhoria de eficiência energética resultaram em uma redução total no consumo de energia elétrica do edifício de 75%;
- O índice de consumo energético (ICE), definido na fase de otimização como o objetivo a ser minimizado foi reduzido de 66,36 kWh/m².ano para 17,18 kWh/m².ano após as melhorias, uma redução de 75%;
- O custo de implementação e custos de operação das soluções propostas são de R\$5.111.800 e R\$433.790, respectivamente;
- O *payback* do projeto em estudo foi calculado como 17 anos, considerando que a vida útil das soluções é de 25 anos, esse número representa uma boa margem para justificar o investimento;
- O índice de lucratividade do investimento foi calculado em 110,8%, valor esse que representa um investimento atrativo, já que apresenta um retorno maior que o investimento inicial;

Como definido no item 2.3 – nZEB, para que um edifício tenha balanço energético quase nulo, um aumento da eficiência energética entre 75% e 100% deve ser atingido. A redução atingida pelo estudo de caso foi de 75%, validando a metodologia desenvolvida.

Além disso, após a análise de viabilidade econômica, concluí-se que o investimento para que o balanço energético quase nulo para o edifício, por mais que tenha um valor muito alto, ainda é vantajoso economicamente, pois o retorno do investimento ocorre antes do fim de vida dos novos equipamentos instalados.

Portanto, concluí-se que a metodologia é válida para atingir o balanço energético quase nulo em edifícios altos, com grande números de pavimentos, climatizados artificialmente e sem ventilação natural.

8.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se a implementação da função objetivo e das restrições definidas na seção 5.5.1 em formulação matemática, para que o valor mínimo de índice de consumo energético seja definido matematicamente, aprimorando a metodologia.

Espera-se que a metodologia desenvolvida no presente trabalho seja transformada em uma ferramenta computacional, seja em formato de planilhas com recursos VBA, ou em uma interface GUI, de fácil entendimento e manuseabilidade, para auxiliar no processo de melhoria energética em edifícios comerciais e possivelmente até atingir o balanço energético nulo.

Espera-se também que vários estudos de caso sejam realizados utilizando a metodologia desenvolvida no presente trabalho, validando-a para diferentes edifícios com diferentes características e em diferentes locais no Brasil, explorando os diferentes aspectos climáticos presentes.

Acredita-se que a metodologia desenvolvida possa se adaptar às novas tecnologias e estratégias de melhoria de eficiência energética que venham a ser desenvolvidas após o término do presente trabalho.

Ademais, espera-se que a metodologia seja aplicada à edifícios reais, auxiliando na redução do consumo energético de maneira efetiva, transcendendo o ramo acadêmico.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADHIKARI, R. S. **Net Zero Energy Buildings: Expense or Investment?**. Dept. Building Environment Science & Technology (BEST) - Politecnico di Milano. Milão, p. 6. 2012.
- ALVAREZ, A. L. M. **Uso racional e eficiente de energia elétrica: metodologia para a determinação dos potenciais de conservação dos usos finais em instalações de ensino e similares**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 1998.
- APTE, M. G. **Associations of indoor carbon dioxide concentrations, VOCs, environmental susceptibilities with mucous membrane and lower respiratory sick building syndrome symptoms in the BASE study: analyses of the 100 building dataset**. Lawrence Berkeley Laboratory National Laboratory. Berkeley. 2002.
- ASHRAE. **ASHRAE Strategic Plan**. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 92.
- ASHRAE. **ASHRAE Strategic Plan Starting 2014**. ASHRAE. [S.l.], p. 7. 2014.
- AWAD, M. M. Theoretical and experimental investigation on the radial flow desiccant dehumidification bed. **Applied Thermal Engineering**, n. 28, p. 75-85, 2008.
- BEGHI, A. A multi-phase genetic algorithm for the efficient management of multi-chiller systems. **Energy Convers Manage**, n. 52, p. 1650-1661, 2011.
- BELL, I. H. Performance of vapor compression systems with compressor oil flooding and regeneration. **Int J Refrig**, v. 1, n. 34, p. 225-233, 2011.
- BERGERO, S.; CHIARI, A. On the performances of a hybrid air-conditioning system in different climatic conditions. **Energy**, n. 36, p. 5261-5273, 2011.
- BRASIL. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. [S.l.], p. 96. 2013.
- BRASIL, M. D. M. A. **GUIA PRÁTICO: CONCEITOS E FERRAMENTAS DE GESTÃO E AUDITORIA ENERGÉTICAS**. Brasília: [s.n.], 2015.
- CALVINO, F. Comparing different control strategies for indoor thermal comfort aimed at the evaluation of the energy cost of quality of building. **Appl Therm Eng**, n. 30, p. 2386-2395, 2010.
- CARLISLE, N. **Definition of a "Zero Net Energy" Community**. National Renewable Energy Laboratory. [S.l.], p. 20. 2009.
- CHAN, A. Performance evaluation of district cooling plant with ice storage. **Energy**, n. 31, p. 2750-2762, 2006.
- CHUA, K. J. **Achieving better energy-efficient air conditioning – A review of technologies and strategies**. [S.l.], p. 18. 2013.
- CONGRADAC, V. Recognition of the importance of using artificial neural networks and genetic algorithms to optimize chiller operation. **Energy Build**, n. 47, p. 651-658, 2012.
- DOE. **Advanced Energy Retrofit Guide**. DOE. [S.l.], p. 199. 2011.
- DOKKA, T. H. **Energy efficient residential buildings for the future – a handbook for designing passive houses and low energy residential buildings**. IEA SHC. [S.l.]. 2006.
- ENERDATA. **Global Energy Statistical Yearbook 2017, 2017**. Disponível em: <<https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>>. Acesso em: 27 Maio 2018.
- EPE. **Nota técnica DEA 12/16: avaliação da eficiência energética e geração distribuída para os próximos 10 anos**. EPE. Rio de Janeiro. 2016.
- EUA. **On-Site Renewable Energy Generation**. U.S Environmental Protection Agency. [S.l.], p. 40. 2014.
- FONG, K. F. Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city. **Solar Energy**, n. 84, p. 227-244, 2010.
- FREIRE, R. Z. Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. **Energy Buildings**, n. 40, p. 1353-1365, 2008.
- FUMO, N. Analysis of combined cooling, heating, and power systems based on source primary energy consumption. **Applied Energy**, n. 87, p. 2023-2030, 2010.
- GE, T. Simulation investigation on solar powered desiccant coated heat exchanger cooling system. **Applied Energy**, n. 93, p. 32-40, 2012.

- GINESTET, S. Control tuning of a simplified VAV system: methodology and impact on energy consumption and IAQ. **Energy Buildings**, n. 42, p. 1205-1214, 2010.
- GUIMARÃES, M. E. **Uma análise para retrofit da envoltória tombada visando a eficiência**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 158. 2017.
- HO, J. C. Performance study of a microturbine system for cogeneration application. **Renewable Energy**, n. 29, p. 1121-1133, 2004.
- JAYAMAHA, L. **Energy-efficient building systems: green strategies for operation and maintenance**. 1ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.
- KIM, J. H. Feasibility study of a bowtie compressor with novel capacity modulation. **Int J Refrig**, v. 8, n. 30, p. 1427-1438, 2007.
- LA, D. Study on a novel thermally driven air conditioning system with desiccant dehumidification and regenerative evaporative cooling. **Building Environment**, n. 45, p. 2473-2484, 2010.
- LAMBERTS, R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- LAUSTS, J. **ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS IN BUILDING CODES, ENERGY EFFICIENCY POLICIES FOR NEW BUILDINGS**. International Energy Agency. [S.l.], p. 85. 2008.
- LAUSTSEN, J. **Definition of Zero Energy Buildings**. International Energy Agency. [S.l.], p. 22. 2009.
- LAZARO, A. PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: empirical model and application to design. **Energy Convers Manage**, v. 3, n. 50, p. 444-449, 2009.
- LAZARO, A. PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: experimental results of two real-scale prototypes. **Energy Convers Manage**, v. 3, n. 50, p. 439-443, 2009.
- LEHMKUHL, F. **Caracterização da Aplicação de Placas de Porcelanato nas Fachadas de Edifício**. UFSC. [S.l.], p. 8. 2000.
- LIN, Z. Comparison of annual energy performances with different ventilation methods for cooling. **Energy Buildings**, n. 43, p. 130-136, 2011.
- LU, L. HVAC system optimization—in-building section. **Energy Buildings**, n. 37, p. 11-22, 2005.
- LU, T. A novel and dynamic demand-controlled ventilation strategy for CO2 control and energy saving in buildings. **Energy Buildings**, n. 43, p. 2499-2508, 2011.
- MA, Z. Supervisory and optimal control of central chiller plants using simplified adaptive models and genetic algorithm. **Appl Energy**, n. 88, p. 198-211, 2011.
- MAISOTSENKO, V. M-Cycle, 2007. Disponível em: <http://www.rexresearch.com/maisotsenko/maisotsenko.htm>.
- MOYA, M. Performance analysis of a trigeneration system based on a micro gas turbine and an air-cooled, indirect fired, ammonia-water absorption chiller. **Applied Energy**, n. 88, p. 4424-4440, 2011.
- NUNEZ, T. Thermally driven cooling: Technologies – developments and applications. **J Sust Energy**, n. 1, p. 16-22, 2010.
- O'BRIEN, W. **The Relationship Between Personal Net Energy Use and the Urban Density of Solar Buildings**. [S.l.], p. 10. 2010.
- PARAMESHWARAN, R. Energy efficient PCM-based variable air volume air conditioning system for modern buildings. **Energy Buildings**, n. 42, p. 1353-1360, 2010.
- PARKER, D. S. **Very low energy homes in the United States: Perspectives on performance from measured data**. [S.l.], p. 9. 2009.
- QUIZA, E. G. **Engenharia Econômica Aplicada à Avaliação de Projetos Imobiliários**. Curitiba, p. 68. 2011.
- QUIZA, E. G. **Engenharia Econômica Aplicada à Avaliação de Projetos Imobiliários**. [S.l.], p. 68. 2011.
- QUOILIN, S. Experimental study and modeling of an organic rankine cycle using scroll expander. **Applied Energy**, v. 4, n. 87, p. 1260-1268, 2010.
- REHVA. **nZEB technical definition and system boundaries for nearly zero energy buildings**. [S.l.]. 2013.
- SAMANEZ, C. P. **Engenharia Econômica**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.
- SANTOS, A. H. M. **Conservação de Energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. 3ª. ed. Itajubá: FUPAI, 2006.

- SARTORI, I. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. **Energy and Buildings**, Oslo, Noruega, n. 48, p. 220-232, 2012.
- SEPPANEN, O. A. Association of ventilation rates and CO2 concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. **Indoor Air**, n. 9, p. 226-252, 1999.
- STOECKER, W. F. **Design of Thermal Systems**. 3. ed. [S.l.]: [s.n.], 1989.
- SUN, Z. In-situ implementation and validation of a CO2-based adaptive demand-controlled ventilation strategy in a multi-zone office building. **Building Environment**, n. 46, p. 124-133, 2011.
- TEH, Y. L. Experimental study of the revolving vane (RV) compressor. **Applied Thermal Engineering**, v. 14, n. 29, p. 3235-3245, 2009.
- TORCELLINI, P. **Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition**. California: National Renewable Energy Laboratory. 2006.
- TORCELLINI, P. **Cost Control Best Practices for Net Zero Energy Buildings Projects**. NREL - National Renewable Energy Laboratory. [S.l.], p. 11. 2014.
- UNITED NATIONS. **Report of The United Nations Conference on the Human Environment**. United Nations. Estocolmo, p. 80. 1972. (A/CONF.48/14/Rev.1).
- UNITED NATIONS. United Nations. **Site da United Nations**, 28 Março 2018. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wpp>>.
- WANG, X. Two-stage heat pump system with vapor-injected scroll compressor using R410A as a refrigerant. **Int J Refrig**, v. 6, n. 32, p. 1442-1451, 2009.
- WARGOCKI, P. Subjective perceptions, symptom intensity, and performance: a comparison of two independent studies, both changing similarly the pollution load in an office. **Indoor Air**, n. 12, p. 74-80, 2002.
- YU, F. W. Experimental determination of the energy efficiency of an air-cooled chiller under part load conditions. **Energy**, n. 30, p. 1747-1758, 2005.
- YU, F. W. Improved energy management of chiller systems by multivariate and data envelopment analyses. **Appl Energy**, n. 52, p. 168-174, 2012.
- ZHAI, Q. X. A review for absorption and adsorption solar cooling in China. **Renew Sust Energy Rev**, n. 13, p. 1523-1531, 2009.
- ZHAI, X. Q. A review for research and new design options of solar absorption cooling systems. **Renew Sust Energy Rev**, n. 15, p. 4416-4423, 2011.
- ZHANG, L. Performance analysis of a no-frost hybrid air conditioning system with integrated liquid desiccant dehumidification. **Int J Refrig**, n. 33, p. 116-124, 2010.
- ZHANG, L. Z. Thermodynamic modeling of a novel air dehumidification system. **Energy Buildings**, n. 37, p. 279-286, 2005.
- ZHAO, X. Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling. **Applied Thermal Engineering**, n. 28, p. 14-15, 2008.