
4 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA: ESTUDO DE CASO APLICADO A CONSTRUÇÃO CIVIL

Mauricio Andrade Nascimento

Doutor em Energia e Ambiente pela UFBA. Mestre em Tecnologias Limpas pela Universidade Federal da Bahia. Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Bahia. Atua como docente no IFBA, como consultor, coordenador de pesquisa e gestor, na área de Construção e Incorporação de Empreendimentos Objetivando a Sustentabilidade.

E-mail: nascimento.mauricioandrade@gmail.com

Ednildo Andrade Torres

Pós-Doutorado pela FAMU/FSU US. Doutor em Energia pela Unicamp. Mestre pela Universidade de São Paulo/Escola Politécnica. Graduação na Universidade Federal da Bahia. Atua como coordenador do Laboratório de Energia e Gás (LEN), da Escola Politécnica da UFBA.

E-mail: ednildo@ufba.br

RESUMO

No Brasil a indústria da construção representa cerca de 3,7% do PIB, enquanto que os edifícios são responsáveis por 36% no consumo de energia primária e respondem por 39% das emissões de CO₂. O conhecimento do consumo energético associado aos materiais e processos construtivos, e a energia consumida nas fases do ciclo de vida de uma edificação, proporciona uma melhor adequação nas escolhas das especificações permitindo que haja interferências ou alterações nos processos construtivos, de forma a conceber um produto final mais eficiente nos aspectos de consumo energético e de sustentabilidade. Este trabalho propõe a avaliação de um estudo de caso considerando a abordagem energética, financeira e ambiental na construção de edifício multi-laboratórios, no campus da UFBA, em Salvador-BA. Foram realizados: inventário dos principais materiais utilizados na construção; levantamento da energia incorporada, considerando às suas reposições ao longo da vida útil; o levantamento dos encargos energéticos associados com a utilização e operacionalização do edifício através da consideração de bancos de dados disponíveis na literatura e de bancos construídos. O inventário permitiu a comparação e interferência nos processos e na substituição de materiais, antes especificados por padrão, por materiais de menor energia incorporada, resultando num ganho em eficiência energética ao final do produto. Esta avaliação energética, pela ótica do ciclo de vida, contribui para o conhecimento e formação de bancos de dados energéticos nacionais de materiais e processos construtivos, enquanto proporciona uma metodologia para composição de índices energéticos para o setor de construção, bastante deficitário no quesito de quantidade e qualidade de informações necessárias para subsidiar avaliações de impacto e de consumo energético visando a sustentabilidade. Os resultados obtidos demonstraram a possibilidade de somar eficiência energética com resultados econômicos no processo construtivo obtendo melhores resultados ambientais. A ferramenta proposta é extremamente produtiva no auxílio à escolha por uma construção mais eficiente e sustentável, podendo ser utilizada em outros setores de produção, e aplicada como mecanismo de controle e gestão pública.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Eficiência energética. Análise de ciclo de vida. Gestão pública. Gestão Urbana.

ABSTRACT

In Brazil, the construction industry represents about 3.7% of GDP, while buildings are responsible for 36% of primary energy consumption and account for 39% of CO₂ emissions. The knowledge of energy consumption associated with materials and construction processes, and energy consumed in life cycle's phases of a building, provides a better fit in the choices of specifications, and interference in the construction processes, in order to design a more efficient product concerning aspects of energy consumption and sustainability. Were carried out: inventory of the main materials used in construction; energy assessments, considering its replacement throughout its useful life; the survey of energy burdens associated with the use and operation of the building through the consideration of databases available in the literature and of built banks. The inventory allowed the comparison and interference in the processes, and in the replacement of materials, previously specified by default, with materials with less embodied energy, resulting in energy efficiency gain by the end of the product. This energy assessment, through the analysis of the life cycle, contributes to the knowledge and formation of national's energy databases of materials and construction processes, meanwhile that it provides a methodology for the composition of the energy indexes of the construction segment, which is very deficient in quantity and quality of information needed to support impact assessments and energy consumption for sustainability. The results demonstrated the possibility of adding energy efficiency with economic results in the construction process, obtaining as well better environmental results. The proposed tool is extremely productive in helping to choose a more efficient and sustainable construction, which can be used in other sectors of production, and applied as a control and public management mechanism.

Keywords: Sustainability. Energy efficiency. Life cycle analysis. Public Management. Urban Management.

4.1 INTRODUÇÃO

De acordo com as projeções do Internacional Energy Outlook (IEO), o consumo mundial de energia entre 2018 e 2050 crescerá em função da taxa média de crescimento do PIB mundial de 3,0% a.a, onde a maior projeção estimou-se em 3,7% e a mais conservadora 2,4% de crescimento. Sendo o crescimento médio estimado de 1,5% nos países OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e 3,8% nos não OECD, no qual se inclui o Brasil. Este crescimento se dará mais forte nos países em desenvolvimento devido ao resultado do seu maior crescimento econômico esperado. Atualmente, espera-se que um maior crescimento econômico ocorra em economias emergentes, especialmente China, Índia, países da Ásia e África, onde o Produto Interno Bruto (PIB) será aumentado a uma taxa média estimada de 4,0% ao ano. Até 2050 há uma expectativa de que esse crescimento demande um aumento no consumo energético da ordem de 50% (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019).

O crescimento econômico está diretamente associado ao consumo de energia, visto que para qualquer atividade que resulte em produtividade econômica, necessariamente haverá um ambiente construído que possibilite a execução desta atividade. O setor da construção, portanto, representa grande parcela neste consumo energético dentro de qualquer sociedade pois é o setor diretamente responsável para a realização do mínimo de infraestrutura necessária para a realização da atividade econômica. O Brasil, país considerado como emergente, acompanha os seus semelhantes na tendência com relação ao crescimento mais acelerado do PIB e um aumento na procura por energia, característica está prevista pelas projeções de consumo energético quando da comparação com o crescimento dos países desenvolvidos. De acordo com o INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2019), os edifícios responderam por cerca de 36% no consumo de energia primária e cerca de 39% das emissões de CO₂ em 2018. Assim, a indústria da construção civil tem uma importância relevante no cenário do país e para o desenvolvimento econômico, pois foi responsável em 2019 por cerca de 3,7% do PIB, mesmo estando em desaceleração nos últimos anos (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2019).

O processo construtivo, devido a sua demanda energética ao longo de todo o seu ciclo de vida, causa impacto ambiental. Deste modo, a concentração de esforços no entendimento das relações energéticas e de seus impactos relacionados nas diversas etapas construtivas, se faz necessária na busca por eficiência energética na atividade de construção. A detenção deste conhecimento pode representar uma poderosa contribuição para reduzir a demanda de energia e os impactos ambientais gerados associados a esta demanda. A obtenção do melhor equilíbrio

entre as relações entre a demanda de energia: na concepção do projeto; na escolha de materiais; escolha dos processos construtivos; das interferências com o meio ambiente; e das tecnologias de produção, podem minimizar o seu impacto final. Uma maior informação e compreensão, por parte dos gestores, de como se comportam as relações entre consumo energético e impacto ambiental gerado decorrente deste consumo, possibilita a tomada de decisões e de planejamento mais assertiva. E esta informação pode ser produzida e provida a partir de metodologias e estudos desenvolvidos para levantamento das demandas por energia, por tipificação e atividade fim do empreendimento, considerando todo o seu ciclo de vida.

A estimativa do consumo de energia relacionado com as fases do ciclo de vida de um edifício, permite a compreensão individual das demandas energéticas para cada fase, enquanto possibilita uma visão globalizada do resultado energético final de energia incorporada numa determinada construção. Através do consumo energético podem ser co-relacionados e mensurados os impactos ambientais estimados locais e globais, classificados em diversas categorias de impacto a exemplo da: acidificação das chuvas; índice de carcinogênicos; potencial de aquecimento global entre outros. Com base no consumo energético, relacionado ao potencial de emissão do CO₂ na atmosfera, é possível estimar, por exemplo, o potencial de aquecimento global relativo ao impacto gerado por determinado empreendimento. Análise dos resultados de impacto, por sua vez permitem a comparação e previsão do impacto associado entre projetos de empreendimentos de construção antes mesmo destes serem realizados. Estes dados energéticos e consequentemente de impacto, são essenciais para a compreensão das possibilidades de redução dos impactos ambientais associados a evento de construção, bem como dos recursos utilizados, componentes materiais e processos. Esses três fatores: energia incorporada, custos de construção e impactos ambientais gerados, estão interligados e devem fazer parte das análises de gestão quando da formatação, licença ou permissão construtiva, e escolha por determinado projeto.

Essa abordagem, considerando a análise de ciclo de vida (ACV), permite a construção e formação de uma base de dados para simulações construtivas e de custos ambientais e energéticos como resultado de uma determinada construção. A grande lacuna para a adoção, pelos envolvidos na execução e gestão do setor construtivo, desta prática de análise conjunta entre custos, demanda energética e impacto ambiental gerado, ocorre principalmente devido à: falta de bancos de dados de energia incorporada nos materiais e processos; falta de metodologias consistentes e de fácil aplicação; associados à falta de informação. A carência de informação sobre os impactos gerados pela atividade construtiva e dos custos relativos a

implantação de tecnologias mais sustentáveis consiste em grande barreira a ser transposta na consolidação de um setor construtivo mais eficiente e sustentável.

Acredita-se que a informação obtida na análise particular deste estudo de caso é útil para o setor da indústria da construção. Funcionando como uma ampla ferramenta de gestão, produção de informação, construção metodológica de fácil aplicação, que pode trazer benefícios para a sociedade como um todo, na medida que contribui para o conhecimento das possibilidades de redução dos impactos ambientais gerados no setor de construção.

Este artigo propõe a avaliação de um estudo de caso considerando a abordagem energética, financeira e ambiental na construção de edifício multi-laboratórios, no campus da Universidade Federal da Bahia - UFBA, em Salvador-BA. O objetivo do estudo consistiu na avaliação da energia associada com a construção da edificação ainda na sua fase inicial de projeto e design.

Com 1.760 m² de área construída total, este edifício abriga laboratórios multiusuários que estão divididos em um piso térreo e mais três andares superiores. Cada pavimento foi concebido para abrigar quatro salas com cerca de 75 m² cada. Foram previstas na concepção a modulação e divisão das salas, bem como a facilitação na adequação dos ambientes. Por esta razão, a estrutura foi concebida privilegiando vãos livres, evitando a distribuição de cargas em poucas colunas estruturais e paredes. A cobertura, seguindo os mesmos princípios de transparência e visibilidade dos pisos inferiores, foi planejada para permitir a colocação de diversos equipamentos para monitoramento ambiental e auto-sustentabilidade do edifício.

Por estar ainda na sua fase de concepção e de se assemelhar ao estilo das construções existentes ao redor do campus, o que possibilitaria a comparação fidedigna em termos de tipologia e serviços prestados à comunidade, a escolha desta edificação como projeto de estudo base conferiu característica positiva nesta modalidade de análise. A possibilidade de comparação à construção anteriormente planejada nos moldes padrão das construções existentes no campus, quanto as características construtivas, atribuem diferencial a este estudo. A possibilidade da nova e desafiadora concepção de projeto, atribuindo os aspectos de construção e utilização final, contemplando a visão de reduzir os impactos ambientais e de contribuir para a sustentabilidade do edifício, também atribui uma grande relevância por sua observação e análise.

Este estudo centrou as suas avaliações nos aspectos de: fase de extração de matérias-primas e consumo de energia na produção de materiais; fase de construção e as demandas de energia nos processos construtivos; na energia consumida na fase operacional da edificação; energia na fase de manutenção no horizonte de vida útil projetada; e culminado com a obtenção

do índice de energia final por metro quadrado (m^2) construído. Duas hipóteses construtivas para o mesmo edifício foram consideradas na avaliação: a primeira envolveu a utilização de materiais, especificações, e sistemas construtivos de acordo com a aplicada para os edifícios existentes no campus. A segunda considerou um novo desenho da concepção de fachadas, e adoção de novos materiais e sistemas construtivos do edifício, com o objetivo de reduzir o consumo de energia durante as diversas fases do seu ciclo de vida.

Os resultados foram obtidos com base nas avaliações dos processos de eficiência energética, incluindo a escolha de materiais de baixa energia, e o consumo de energia primária que foi avaliado durante o ciclo de vida de construção, considerando a vida útil estimada de projeto. Com base nos dados gerados, e com o intuito de observar a sua relação com os resultados de eficiência energética obtidos, foram também incluídos na consideração os custos praticados para as duas hipóteses durante o ciclo de vida do produto, contemplando para tal: o custo financeiro de aquisição de materiais e de montagem para a construção; os custos de energia na fase de utilização na construção; e os custos de manutenção e reparação ao longo da sua vida útil.

Esta abordagem atribui uma melhor compreensão das possibilidades de intervenção no processo construtivo e dos seus custos decorrentes, tanto na sua fase inicial, quanto em fases posteriores, permitindo uma análise qualitativa na relação entre os custos praticados nas intervenções e no resultado econômico final.

4.2 REVISÃO DE LITERATURA

Existem vários pontos críticos com relação às atenções relacionadas ao meio ambiente no Brasil: o desmatamento da floresta amazônica e a poluição urbana são dois dos grandes problemas. O urbanismo, que se por um lado objetiva a transformação do espaço visando uma melhoria estética e da qualidade de vida, enquanto transmite segurança e conforto, por outro, também consiste em importante questão com relação ao meio ambiente. O Desenvolvimento econômico, que impulsiona o setor construtivo, também invoca atenção para os problemas ambientais. A "edificação verde" já é considerada com grande poder no desempenho de papel relevante no esforço para tornar as cidades brasileiras mais saudáveis e mais sustentáveis.

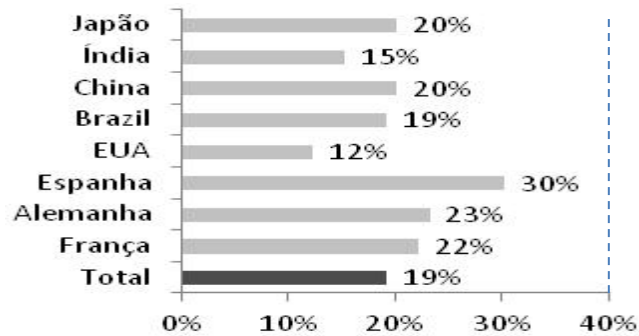
O setor da construção que é responsável por parte significativa da economia no Brasil, é também relevante no consumo de matérias primas naturais, atingindo níveis que variam de 15% a 50% de todos os recursos naturais consumidos na sociedade (JOHN; AGOPYAN, 2003).

Associado a este fato, o setor construtivo responde por parcela significativa de contribuição na produção de resíduos, sendo, portanto, um dos setores que mais impactam o meio ambiente no quesito relacionado as emissões de poluentes. Mais de 50% da massa de resíduos urbanos são provenientes de canteiro de obras, de acordo com Pinto (1999), e como no Brasil não há prática usual na utilização destes resíduos proveniente da construção, a exemplo dos países europeus que chegam a reciclar quase que 90% dos resíduos, de acordo com Dorsthorst e Hendriks (2000), estabelece-se uma questão de ordem pública quanto a necessidade de melhoria na gestão dos rejeitos. Este fato implica em diversos problemas de gestão urbana, normalmente encontrados nos grandes centros e que também implica na qualidade do saneamento básico e na saúde como um todo. De acordo com Furtado (2003), além de ser um dos setores mais influentes nas atividades sociais e econômicas de um país, a construção é também uma importante fonte de degradação ambiental, o que reforça a necessidade na atenção para o setor, a fim de torná-lo ambientalmente e economicamente sustentável. Como afirma Kiperstok et al. (2020) “[...] A proposta de adoção da prevenção da poluição como um princípio tem de considerar todos os aspectos que podem reduzir o impacto ao meio ambiente [...]”. Portanto, as bases do setor da construção devem ser apoiadas por princípios, tais como: redução dos resíduos gerados, melhora da eficiência no uso dos recursos naturais e no consumo de energia, prevenção da poluição, além de planejamento integrado entre construção e ambiente. Esses princípios remetem o setor de construção para a utilização de processos de produção mais limpa e de análise do ciclo de vida (ACV), de forma a prever e planejar futuros impactos decorrentes da atividade construtiva.

É uma observação factível afirmar que os profissionais envolvidos no setor de construção são os mais relevantes para influenciar nas mudanças e intervenções nos processos inerentes a atividade construtiva. Portanto, as atitudes e percepções desses profissionais têm influência significativa sobre a meta para alcançar o desenvolvimento sustentável deste setor. Isto consiste num grande obstáculo a ser transposto para chegar ao objetivo na prática por construções mais sustentáveis. Haja visto que grande parte dos profissionais da indústria da construção atualmente reconhecem que os edifícios sustentáveis são importantes para o meio ambiente, contudo, eles subestimam a contribuição dos edifícios no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa. De acordo com a publicação do WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (2007), quando profissionais do setor de construção foram questionados sobre o CO₂ liberado direta ou indiretamente no meio ambiente pela contribuição dos edifícios, e sobre a percentagem no aumento de custos para a realização de um empreendimento certificado como sustentável em comparação com um projeto normal, as

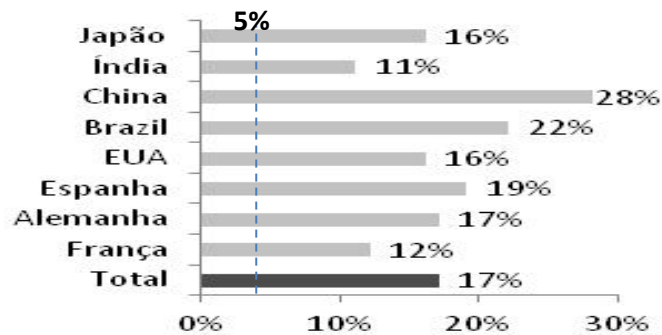
respostas denotaram uma distorção em relação a percepção real. Os resultados deste questionamento representado graficamente se apresentaram como mostrado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Contribuição das construções nas emissões totais de CO₂



Fonte: WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2007.

Figura 2 - Acréscimo de custo para construção ambientalmente certificada



Fonte: WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2007.

A análise destes dados demonstra que os profissionais superestimam o custo adicional de um edifício certificado e ambientalmente sustentável, que é de **cerca de 5%** para os países desenvolvidos, e subestimam a contribuição dos edifícios para as emissões de gases de efeito estufa, que é atualmente **cerca de 40%**. Cabe ressaltar que a cultura, costumes, e situações particulares influenciam obviamente nesta percepção e as diferenças entre opiniões mostram que a influência do ambiente local possivelmente determine diferentes visões sobre os fatores que influenciam a sustentabilidade. Isso reforça a visão que o grau de educação, informação e conhecimento são fatores cruciais em ações globais e intervenções que podem ser feitas no setor para o desenvolvimento sustentável.

No que tange a consideração de um dado processo na produção de materiais básicos para construção por exemplo, é fundamental a consciência sobre os impactos decorrentes desta

atividade para um melhor resultado na busca da prevenção de possíveis danos ambientais, e tal abordagem, através deste conhecimento adquirido, permitirá a realização de processo mais sustentável.

A análise do ciclo de vida de uma construção pode ajudar a compreender estes impactos. Esta análise poderia ser definida como o processo em que o fluxo de materiais e energia circulando em um dado sistema são quantificados e avaliados. Nas metodologias observadas na literatura, esta avaliação é realizada em etapas, muitas vezes considerando todo o ciclo que envolve: a extração, a produção, construção, transporte e, em fases posteriores, a consideração de demolição e disposição final. Numa segunda hipótese de consideração, os impactos globais e/ou regional são calculados com base no consumo de energia, geração de resíduos e outras categorias de impacto (SCHEUER; KEOLEIAN; REPPE, 2003). Em geral, o sector da construção é considerado responsável por 30% a 40% da procura de energia total de uma sociedade, e aproximadamente 44% dos recursos materiais utilizados, assim como parte de quase 1/3 da emissão total de CO₂ na atmosfera (ERLANDSSON; BORG, 2003. p. 919-938).

Desta forma, através da consideração destes dados, é possível admitir que, a redução dos encargos ambientais associados ao evento de construção é indispensável para o planejamento e desenvolvimento sustentável. Pesquisas realizadas em todo o mundo atribuem conhecimento sobre a influência nos impactos ambientais para diferentes tipos de materiais e processos na construção.

Uma quantidade considerável de energia é utilizada em processos de fabricação e transporte de materiais utilizados na construção, e a redução no consumo de energia está diretamente relacionada à redução das emissões atmosféricas e outros impactos ambientais. A observação de alguns estudos relacionados mostra a importância da análise de dados e sua participação em qualquer estimativa feita durante o ciclo de vida dos edifícios. A fabricação de materiais de construção contribui de fato para a produção dos gases de efeito estufa, tais como o dióxido de carbono, e há uma grande preocupação na redução das emissões decorrente destes gases a fim de mitigar os impactos ambientais.

Buchanan e Honey (1994, p. 205-217), desenvolveram estudos na Nova Zelândia que envolvem a energia necessária para produção e processamento de diferentes materiais de construção e suas correlações com as emissões de CO₂ e suas implicações ambientais, e também demonstraram que a construção de casas multi-pavimentos feitas em madeira necessitam menor energia por (m²), e geram menos emissões de CO₂ do que as casas feitas de aço ou concreto armado. Trabalhando com a mesma ideologia, Kirk e Dell'Isola (1995, p. xiii, 262) e Oka et al. (1993, p. 303-311) estimaram e atribuíram o uso de energia para a fabricação e montagem de

materiais, associando-os aos impactos ambientais. Ambos estudos objetivaram conhecer as relações energéticas e atribuição de uma metodologia de consideração que possibilitasse a comparação do potencial de impacto ambiental gerado por estes materiais e processos. Outros estudos compararam a energia necessária e as emissões de CO₂ por metro quadrado de área de construção para diferentes tipos de empreendimentos.

Na Índia, país que possui grande dificuldade no suprimento de energia, considerado emergente assim como o Brasil, em Debnath et al. (1995, p. 141-146) desenvolveram um estudo comparativo de energia necessária para diferentes tipos de construção residencial. Três tipos de construções foram avaliados de modo comparativo: individuais, duplos e múltiplos andares, onde o consumo de energia por área construída foi estimado em cerca de 3,05 GJ/m². Vale ressaltar que nesta pesquisa foram consideradas a energia necessária apenas para os materiais e os processos de construção dos edifícios. Por conclusão, foram identificados que os blocos, o cimento e o aço foram os três principais contribuintes para o encargo energético de construção.

De acordo com a linha de pesquisa e consideração de diversos autores, a utilização de materiais alternativos ou a redução na energia para a sua fabricação podem contribuir na consolidação da energia final de um empreendimento realizado, e devem ser contabilizadas objetivando a redução na utilização de energia em um edifício, outros estudos avançaram no aprofundamento do comportamento energético de uma edificação e investigaram sua concepção estrutural.

Eaton e Amato (1998, p. 286-287) realizaram uma análise de ciclo de vida (ACV) em construção, comparando edifícios estruturados em aço e concreto, dando atenção para a influência desses materiais na contribuição total de energia nos edifícios. Há uma variedade de trabalhos relatados na literatura sobre métodos aplicados à análise do ciclo de vida relacionada com a atividade de construção, alguns, em particular, são de fundamental importância para a compreensão e discussão dos resultados e da base do conhecimento das análises de ciclo de vida voltadas para mensuração da energia incorporada em construções. Pode-se citar: o trabalho de Venkatarama Reddy e Jagadish (2003, p. 129-137) realizado na Índia, o estudo de caso realizado por Scheuer et al. (2003, p. 1049-1064) na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos da América, o estudo de Li (2006, p. 1414-1422) no Japão, entre tantos outros trabalhos investigados a exemplo de: Martinez (2010), Verrier et al. (2014), e De Carvalho et al. (2017).

O estudo realizado na Índia por Venkatarama Reddy e Jagadish (2003, p. 129-137) que segue a prática da ideologia de Debnath et al. (1995, p. 141-146), considerou a inclusão da parcela de energia referente aos eventos de transporte na quantidade total de energia necessária para a fabricação de diferentes tipos de materiais básicos aplicados na construção. De acordo

com estes autores a energia incorporada, e implícita a realização de um empreendimento poderia ser descrita de maneira seccionada como: a energia utilizada para serviços de manutenção ao longo da sua vida útil; e a energia envolvida na utilização de diferentes materiais utilizados na fase de construção do edifício. Nesta divisão, a fase de construção foi categorizada como: a energia consumida na produção de materiais básicos de construção; energia necessária para o transporte dos materiais até o local de produção; e a energia necessária para a montagem dos vários materiais na construção do edifício.

Diversos autores abordam de maneira mais ou menos completa a questão da influência da energia nos empreendimentos e as relacionam com algum potencial de impacto. Mais comumente, no âmbito da construção civil, o parâmetro de impacto adotado é a emissão de CO₂ e sua relação com o efeito no aquecimento global. Embora não seja consenso a inclusão do consumo de energia relacionado com a fase de demolição como um fator importante no ciclo de vida da construção, estes são inclusos em alguns estudos. Contudo, na maioria destes é apontada a importância da energia contida nos materiais e nos processos de construção como significativo, associados a energia demandada nas fases de serviço e manutenção.

Uma pesquisa de referência para consideração metodológica no levantamento energético para edificações foi realizada no campus da Universidade de Michigan por Scheuer et al. (2003). Nesta, foi realizada um estudo de caso que envolveu o ciclo de vida de um edifício universitário com uma área de 7.300 m² e com um horizonte de vida útil projetada para 75 anos. Foram inventariados os materiais considerando também alguma reposição durante os vários estágios de desenvolvimento do produto. Este inventário incluiu: a estrutura, as fachadas, os acabamentos interiores e sistemas sanitários. Como fases do ciclo foram admitidas: produção de materiais; transporte ao local de construção; fase de serviços de construção e demolição.

A importância deste trabalho reside no fato que questionou estudos anteriores de ciclo de vida para edifícios, realizados com base apenas na identificação parcial dos encargos ambientais, e guiados por informações generalizadas a partir dos estudos de banco de dados históricos do empreendimento. A análise mais abrangente de ciclo de vida considerando a construção de um edifício moderno, no campus da Universidade de Michigan, permitiu não só uma comparação com os resultados obtidos no presente trabalho, como também, contribuiu nas estimativas preliminares energéticas na construção da edificação objeto do estudo de caso, no campus da UFBA. Haja visto que, orientou abordagens na análise parcial para determinação das primeiras intervenções e/ou abordagens na análise de resultados e dos dados gerados preliminares. O resultado estimado de energia primária consumida pelo projeto consolidado e já executado na Universidade de Michigan, considerando todo o ciclo foi de $2,3 \times 10^6$ GJ o que

equivaleu à taxa de 316 GJ/m² do empreendimento. A produção e transporte de materiais em conjunto com a construção representaram 2,2% do consumo total de energia primária, enquanto 94,4% foi atribuída ao consumo de eletricidade do conjunto de ventilação artificial e condicionamento de ar ao longo da sua vida útil.

Destes resultados extraem-se que a climatização representa uma grande demanda energética, principalmente quando considerada a vida útil de funcionamento da edificação. Serviços de água representaram 3,3% da fase total e a etapa de demolição apenas cerca de 0,1% do total. Como conclusão, foi observado que a distribuição do consumo de energia e impactos ambientais foram concentrados na fase de utilização do edifício, e em todas as classificações, exceto na geração de resíduos, a fase de operação foi responsável por mais de 83% dos impactos ambientais inventariados. Esta compreensão remete ao fato que a atenção a concepção arquitetônica das edificações deve ser enfatizada. Melhorias no envelope (fachadas) podem reduzir substancialmente o consumo de energia e os impactos. As especificações de materiais menos energéticos e com menor massa térmica, associados ao aproveitamento dos fluxos de ar naturais, podem trazer grandes benefícios ao conjunto dos resultados energéticos e de impacto. A substituição na geração de energia para abastecimento dos sistemas de ar condicionado, aquecimento e ventilação artificiais por fontes mais limpas, reduzem o impacto ambiental em maior proporção uma vez que estes fatores representaram o maior impacto.

Outro estudo que amplia as considerações de impacto e energia nos levantamentos associados ao ciclo de vida dos edifícios da autoria de Li (2006, p. 1414-1422), que propôs a divisão de avaliação de impacto em duas categorias: encargos locais e encargos contidos no edifício. Os encargos locais são aqueles considerados dentro da região onde a construção é realizada, enquanto que encargos contidos no presente caso, refere-se aos impactos da expansão da infraestrutura necessária para operar o edifício, como estradas e vias de acesso, estacionamentos e etc. Este estudo realiza uma crítica as pesquisas anteriores de ACV, destacando que na maioria deles, o dano ou encargo ambiental não é tratado de maneira setORIZADA. Baseia-se no impacto geral causado ao meio ambiente, no entanto, a parcela de impacto local relacionados com o edifício não é estimado. Consideram a quantificação do impacto ambiental associado ao próprio edifício em si, no entanto, os encargos ambientais associados com a infraestrutura necessária para a operação do edifício, a exemplo de estradas de acesso e estacionamentos, são desprezados. Outro ponto importante de crítica presente neste trabalho de Li, é que o foco nas discussões sobre a redução dos impactos associados com edifícios se concentram principalmente sobre a extensão da vida útil do edifício (durabilidade), o uso de materiais reciclados, e escolha para sistemas com baixo consumo de energia e baixo

índice de poluição, deixando de lado a importante consideração dos impactos associados com o local e a forma de construção estrutural.

A questão proposta neste presente trabalho indica a necessidade de uma abordagem ampla, contudo de factível aplicabilidade na consideração de vários aspectos e singularidades relacionadas com a construção de uma edificação. Caso haja uma avaliação metodológica rasa, haverá possivelmente uma subestimação do impacto ambiental associado com edifícios, e uma falha na informação e na produção de dados úteis no apoio às medidas para proteger o meio ambiente regional e planejamento urbano.

No Brasil, ainda que de modo mais modesto, a preocupação sobre a oferta e o consumo de energia associado com a indústria construtiva pode ser observado em alguns estudos. Alguns trabalhos realizaram comparativos do potencial de aquecimento global, analisando simulações para diferentes cenários de uma edificação, a exemplo de Nakao (2010). Outras pautaram sua análise concentrada na influência das variáveis construtivas e da utilização de equipamentos na ocupação, de acordo com Nascimento (2009). Trabalhos com a concentração na área de desenvolvimento de ferramentas computacionais como auxílio a análise de ciclo de vida também foram desenvolvidos a exemplo de Rodrigues et al. (2008). Este movimento demonstra que ainda que de forma incipiente e embrionária, há de fato uma atenção voltada para as questões de concepção de empreendimentos de construção com foco na sustentabilidade. As questões do setor construtivo sobre o aspecto energético também foram investigadas a exemplo de Lomardo e Rosa (2004, p. 89-95), que discutiram a falta de planejamento energético no país e a importância da legislação específica e práticas para melhorar o setor da construção e, portanto, obter edifícios com maior eficiência energética. Ordenes et al. (2007, p. 629-642), analisaram a integração da energia fotovoltaica para uso em projetos de construção comentando sobre a contribuição desta fonte de energia para a preservação dos recursos naturais. Neste referido estudo, os autores demonstraram a viabilidade da aplicação fotovoltaica para países de baixa latitude, como o Brasil, e desta forma, caracterizando a vertente na utilização também de energias renováveis e sua maior representação no setor construtivo.

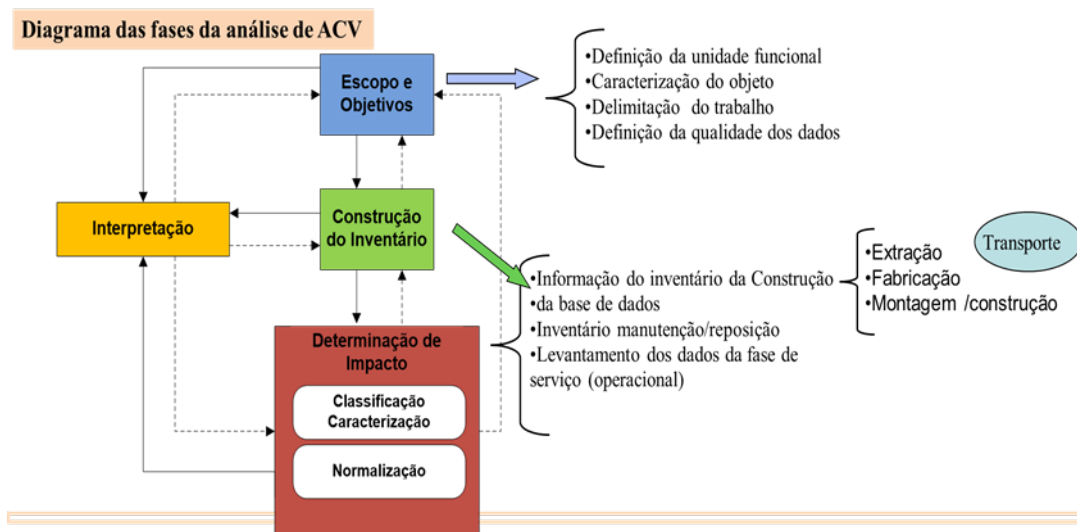
No entanto, devido principalmente ao fato de que não existe praticamente nenhuma base de dados sobre o consumo de energia e de encargos ambientais relacionados com materiais e com processos dentro da atividade de construção, associados a falta de conhecimento profissional sobre este assunto, há apenas poucas experiências sobre os dados de avaliação que poderiam contribuir para a concepção de construções melhores e mais sustentáveis. Neste contexto, uma melhor compreensão das tecnologias limpas e métodos de ACV pode contribuir para melhoria do cenário energético envolvido na construção civil. A produção de informação

qualitativa e quantitativa que embasassem as decisões antes do processo de construção (fase de concepção do produto), ou mesmo durante o processo construtivo, permitindo que houvessem interferências e melhorias. Este conhecimento é primordial para o auxílio na tomada de decisões estratégicas pelos gestores, empresários, e fornecedores de matérias-primas relacionadas com a atividade de construção, proporcionando benefícios para a sociedade como um todo.

4.3 MÉTODOLOGIA

Conforme é preconizado nos estudos em ACV, foi definida a unidade funcional de análise global para o empreendimento levando em consideração os seus fluxos de referência, que incluem, as quantidades necessárias de um produto para satisfazer uma certa função. A unidade funcional adotada foi, portanto, o metro quadrado (m^2) de área construída do empreendimento em estudo. Foi então delineado o escopo inicial do trabalho e definido primariamente os limites de abordagem que nortearam a condução para esta análise. Cabe ressaltar que uma análise de ACV é dinâmica e, portanto, o escopo de aplicação não se comportou estaticamente durante este trabalho. Este escopo foi ajustado para acomodar as diversas variáveis no que diz respeito às estimativas de ACV aplicados ao edifício. Os objetivos foram delineados como etapas de trabalho, e para cada etapa cumprida, nova consideração de avaliação foi produzida em função dos resultados obtidos, que em diversas ocasiões sugeriu uma reavaliação do escopo original. A Figura 3 ilustra a concepção do diagrama modelo de pesquisa utilizado. São muitas as interações entre os levantamentos de energia envolvidos na extração de matérias-primas, bem como dos materiais e processos de produção, e a análise de ACV foi utilizada isoladamente para cada fluxo considerado de materiais e também utilizada de forma combinada quando da avaliação dos fluxos de processos, através da utilização de ferramentas desenvolvidas para auxiliar no inventário. Assim, a criação e definição de "pontos de corte" são necessários para avaliar a viabilidade e praticidade nestes levantamentos. Estes pontos são fornecidos e descritos na literatura a fim de adaptar as pesquisas para a realidade de cada trabalho, e permitindo ao descrever os processos de coleta de dados, a clareza quando da comparação com os dados a partir de fontes diferentes. Deste modo, conforme descrito na normatização de estudos de ACV, a confecção das bases de dados foi cuidadosamente documentada.

Figura 3 - Diagrama modelo de pesquisa



Fonte: Elaboração própria 2014.

O passo seguinte consistiu na definição do escopo do sistema estrutural para a caracterização do objeto de estudo e do grau de definição e abordagem para o trabalho, seguido da determinação da qualidade dos dados. A base para a realização do inventário foi então moldada, onde a entrada e saída dos fluxos de materiais e de energia foram classificadas pautados no conhecimento das quantidades utilizadas no projeto e da energia incorporada para os vários materiais e processos a serem utilizados na construção. Foram consideradas duas hipóteses de solução construtiva para possibilitar a comparação. O objetivo foi de prover à metodologia, a possibilidade de simulação de diferentes alternativas para a construção de edifícios e também de simular a sua utilização posterior a construção, gerando, portanto, neste caso, dois inventários diferentes. A intenção principal de efetuar a análise utilizando dois modelos foi observar o comportamento dos dois sistemas construtivos, aumentando assim a sensibilidade na apreciação dos dados. Isso também permitiria a observação das interferências necessárias ao projeto. Os dois modelos de concepção e desenvolvimento dos cenários foram nomeados: Construção Básica (CB) e Construção Energeticamente Eficiente (CEE).

O empreendimento realizado que foi o objeto de estudo de caso, consiste em uma edificação com área total construída de 1.760 m². Dividida em: um pavimento térreo, três pavimentos que serão utilizados como multi-laboratórios, e um pavimento de cobertura também integrado ao conjunto que servirá como área para experimentos com energias renováveis (vide figura 4), este empreendimento encontra-se localizado no campus Ondina da universidade Federal da Bahia.

Figura 4 - Perspectiva da edificação CEE



Fonte: Projeto base CIEnAm 2009.

Para a escolha do local da edificação foram levados em consideração alguns fatores que estão diretamente conectados com a aplicação da análise de ciclo de vida visando o menor impacto e a maior integração com o ambiente. A proximidade das unidades de Física, Química, Geociências e PAF, a facilidade de acesso rápido a Politécnica e a unidade de Arquitetura, associada a facilidade de acesso ao exterior do campus. Além destes aspectos, a integração harmônica com as áreas de circulação e praças de acesso, estudadas e planejadas quanto a capacidade de fluxo, contribuíram para a não construção de novas vias de acesso para veículos. Além desta razão, a topografia praticamente plana do terreno favorecia a sua construção, enquanto evitava a necessidade de grandes movimentações de terra, o que implicaria em maior número de horas de máquinas trabalhando e conseqüentemente maior gasto energético e maior impacto ambiental associado. O posicionamento e a volumetria da edificação ao longo da encosta preservaram a vegetação natural e atribuiu à mesma um melhor aproveitamento das correntes de ar, bem como as fachadas principais, orientadas para o sudoeste, permitiram uma menor absorção quando da incidência solar e menor acúmulo de calor sobre a massa térmica do empreendimento. (vide Figura 5).

Figura 5 - Edificação concluída



Fonte: Google Earth Inc./ registro próprio 2017.

As expectativas das múltiplas atividades que poderão constituir o edifício exigem em primeiro lugar, a concepção de edificações flexíveis quanto ao uso, cujos espaços internos sejam amplos o suficiente para favorecer adaptações e modificações ao longo do tempo. Em planta, a edificação foi dividida em duas seções com área aproximada de 150 m², interligadas entre si pela escada e área de circulação com sanitários e serviços. O andar térreo foi destinado, em geral, para uso dos estudantes, com possibilidade de eventos e exposições abertas. Os três andares superiores, destinados a atividades diversas, foram projetados com quatro salões de 75 m² cada, que podem ser subdivididos em salas menores ou anexados por setor de 150 m², se assim for necessário. Vãos livres foram priorizados na confecção da estrutura de forma a transmitir leveza e mobilidade ao projeto. A cobertura, que sofreu isolamento térmico e foi impermeabilizada, seguiu os mesmos princípios dos andares inferiores, permitindo a colocação futura de equipamentos diversos para monitoramento do meio ambiente e auto-sustentabilidade da edificação.

O cenário **CB** reproduz a réplica do projeto de sua implementação tal como definido pelo padrão encontrado nos edifícios existentes no campus, que incluem: projeto de fachada, especificações de materiais, sistemas operacionais e bases estruturais, semelhantes ao projeto inicial e similares em suas características. O cenário **CEE** reflete a execução do projeto através da consideração de seu design e características de construção relacionados com a produção mais limpa e análise do ciclo de vida, visando a realização de um edifício energeticamente mais eficiente e, portanto, menos prejudicial ao meio ambiente. Para definir uma linha de base para a realização de comparações entre o **CB** e a **CEE**, ambos os edifícios tiveram que ser

semelhantes. É necessário para efeito comparativo coerente que os mesmos objetos de estudo, no caso a construção do edifício laboratório, tenham as mesmas características de funcionalidade e finalidade. Isto significa, portanto, que devem ser iguais em área, proporcionando a utilização do mesmo tipo de serviço em termos de qualidade e quantidade.

A concepção arquitetônica escolhida para a CEE também constitui outro fator importante que influencia no resultado final de impacto ambiental. Enquanto mantém a funcionalidade equivalente a CB, provê melhorias no aproveitamento da iluminação e ventilação natural; melhor fluxo de ar quente através do edifício; diminuição no acúmulo de calor através da massa térmica do empreendimento; mudanças nas especificações dos materiais por materiais com menos encargos energéticos e de maior durabilidade; eliminação de processos e de materiais na construção; aproveitamento dos serviços de água através de ferramentas de re-uso e de gestão do recurso; redução no consumo energético do empreendimento através da não utilização de climatização artificial e equipamentos de iluminação mais energeticamente eficientes. Este conjunto de fatores pôde atribuir a CEE uma eficiência energética maior em relação à CB ao longo do ciclo de vida do empreendimento.

Na fase preliminar foram avaliados os encargos energéticos contidos nos materiais e nos processos construtivos através do uso de alguns softwares específicos e seus respectivos bancos de dados disponíveis, além de consulta a outros bancos de dados de materiais e processos na literatura, a exemplo dos softwares ECOINVENT (2009) e do SIMaPRO (2008). Consideraram-se as etapas de extração, transporte da matéria-prima e fabricação materiais, sua respectiva mobilização e transportes necessários até o local da construção, e sua montagem (processo de construção). Estes encargos foram acessados de acordo com os dados obtidos a partir de empresas de construção e com a consideração de dados com base na literatura, sendo também incluso os fluxos de materiais e de energia considerando a etapa de manutenção e substituição de materiais durante a vida útil do projeto.

Num segundo passo, foi considerada a energia contida na fase operacional do projeto, levando em conta o consumo de energia primária de acordo com os serviços previstos prestados pela edificação quando da sua operação. A utilização de equipamentos, e dos sistemas básicos de funcionamento e operação da infraestrutura fizeram parte desta etapa da análise. A última fase da análise dos dados resultou na construção de um novo relatório, incorporando novos dados ao deficitário banco de dados energéticos brasileiro para materiais e processos de construção, e contribuindo para o fomento pela cultura e prática deste tipo de metodologia de análise. Os dados encontrados foram ajustados para os dois modelos de construção propostos e comparados com bases de dados da literatura. Após a análise e purificação destes dados, o passo

seguinte foi a consideração e totalização da energia para o evento de avaliação e projeção de impacto construtivo com base apenas no potencial de aquecimento global associado com o consumo de energia. A partir da análise global preliminar, e das considerações dos resultados preliminares relativos aos bancos de dados de energia e inventários da energia contida nos diversos processos, foi realizada uma primeira etapa de intervenções tanto na concepção do projeto, quanto nas diretrizes metodológicas da análise. Estas intervenções foram positivas para a compreensão da importância no conhecimento dos aspectos locais na consideração da energia que envolvem a construção, no sentido de que os bancos de dados existentes muitas vezes não refletem a realidade brasileira, uma vez que são baseados principalmente em dados da literatura estrangeira. Essa percepção foi importante na tomada de decisões e planejamento de construção, bem como na assistência ao processo de fazer os bancos de dados próprios e da metodologia final da pesquisa.

É importante o destaque que, os dados principais para o trabalho de avaliação de impacto consideraram as questões relacionadas com a energia total incorporada no empreendimento. A metodologia de levantamento energético sugerida considerou várias abordagens presentes na literatura. A abordagem geral de todo o ciclo do objeto de estudo de caso foi realizada considerando a extração de recursos, a fabricação, construção e utilização, como descrito em alguns estudos na literatura, e considerou também o transporte de materiais envolvidos nas várias fases do ciclo, o que não é prática na maioria dos estudos considerados e relatados. A peculiaridade desta metodologia de estudo deve-se ao fato que, como o objeto de estudo encontrava-se precisamente na fase de planejamento executivo, a metodologia de levantamento energético pôde ser validada passo a passo durante a construção do projeto, e pôde também sofrer interferências com o seu próprio curso, proporcionando melhorias para o processo final de construção além de torná-la uma ferramenta útil para orientar o aperfeiçoamento do projeto, de acordo com as avaliações de suas interações com o processo de construção. A escolha do local de implantação do empreendimento também foi relevante para os resultados obtidos. O posicionamento do edifício, bem como sua orientação visaram o menor impacto e uma melhor integração com o meio ambiente. A proximidade das edificações funcionais existentes, juntamente com a facilidade de acesso para o exterior do campus, proporcionou uma integração harmoniosa. Isso contribuiu para evitar a construção de novas vias de acesso para os veículos, o que causariam maiores impactos relacionados à infraestrutura local, como relatado por Li (2006). Além destas razões, a escolha pela implantação em local específico evitou a necessidade de grandes obras envolvendo cortes e/ou aterros e reduzindo o impacto ambiental gerado. A

disposição e o desenho do projeto proporcionou uma melhoria na utilização de correntes de ar, o que reduziu também a temperatura ambiente interna.

A fachada principal, orientada para o sudoeste, permitiu uma menor absorção da luz solar e acúmulo de menor calor sobre a massa térmica do edifício. O projeto arquitetônico escolhido para o CEE também é outro fator importante que influenciou os resultados energéticos. Enquanto se mantém a funcionalidade equivalente a CB, proporciona a melhoria na utilização de dispositivos de iluminação natural e de ventilação com um melhor fluxo de saída do ar quente através do edifício. Estas premissas de projeto definidas em função do conhecimento adquirido nos estudos preliminares aplicados através da metodologia inicial proposta, levaram à mudanças nas especificações de materiais proporcionando menores custos de energia e maior durabilidade. A eliminação de processos e materiais na construção, o uso de serviços de água através de ferramentas de reutilização e gestão de recursos naturais, foram também elementos que contribuíram para a obtenção dos resultados. As simulações realizadas indicaram a possibilidade substancial na redução no consumo de energia através da minimização do condicionamento de ar e do uso de equipamentos de iluminação artificial mais eficiente em termos energéticos. Estes fatores atribuíram a CEE eficiência energética superior em relação ao CB ao longo do ciclo de vida do empreendimento. Uma comparação das características de ambas as hipóteses de construção pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Características de construção para (CB) e (CEE)

continua

Sistema Construtivo	Características específicas (CB)	Características específicas (CEE)
Fundações	Cravação de estacas metálicas	Cravação de estacas protendidas em concreto
Superestrutura	Em concreto armado fck 30 MPa	Em concreto armado fck 30 MPa
Paredes externas	Em bloco cerâmico	Em bloco de cimento e combogos em cimento
Paredes internas	Em bloco cerâmico com trechos em combogo cerâmico	Em bloco de cimento com trechos em combogo de cimento
Janelas	Em alumínio nas fachadas frontal e posterior	Em breze em alumínio no vão de escada e alumínio na fachada posterior
Portas	Em madeira	Em madeira
Cobertura/telhado	Laje de cobertura impermeabilizada com pavimentação em cerâmica	Laje de cobertura impermeabilizada com pavimentação em piso de alta resistência
Pavimentação	Piso cerâmico tipo lajota	Piso em alta resistência e cerâmico nos sanitários
Revestimento Interno	Massa única com acabamento em pintura acrílica sobre massa corrida em todas as paredes; nos sanitários massa única com acabamento em	Cerâmica colada sobre massa única somente com nos sanitários; nas demais paredes azulejo biscoito fino h: 1,50m aplicado.

Tabela 1 - Características de construção para (CB) e (CEE)

Sistema Construtivo	Características específicas (CB)	Características específicas (CEE)
	cerâmica colada sobre a massa única.	direto sobre o bloco e acima de 1,50m pintura texturizada aplicada direto sobre o bloco.
Revestimento Externo	Massa única com acabamento em pintura acrílica sobre massa acrílica	Tinta acrílica sobre os elementos estruturais; textura aplicada diretamente sobre os blocos
Controles elétricos Iluminação /lógica	Controles elétricos manuais; medição de entrada única; luminárias padrão conforme projeto; instalações de lógica cabeadas; utilização de climatização artificial.	Controles elétricos manuais; medição individual por laboratório; luminárias de alta eficiência conforme projeto, instalações de lógica cabeadas, climatização natural.
Controles hidráulico	Controle manual; rede de água fria e de coleta de esgoto e pluvial.	Controle manual com válvulas temporizadas de fluxo, rede de água fria e de coleta de esgoto e pluvial; aproveitamento pluvial através de captação na cobertura.
Eletricidade	100% de fornecimento da concessionária local	Controle manual com válvulas temporizadas de fluxo, rede de água fria e de coleta de esgoto e pluvial; aproveitamento pluvial através de captação na cobertura.
Água potável	100 % de fornecimento da concessionária local	100 % de fornecimento da concessionária local
Rede de coleta	Disposição Oceânica	Disposição Oceânica

Fonte: Elaboração própria 2017.

No que tange aos limites da pesquisa e seu "ponto de corte", os processos avaliados nas etapas de análise distribuídos foram: extração de matérias-primas e produção de materiais de construção básicos (por exemplo, areia, água, agregado miúdo e graúdo, blocos, madeira, cimento, aço, etc.); fabricação de elementos e componentes para a construção (madeira e estruturas de alumínio, vidro, cerâmica, tintas, concreto, etc.); transporte de matérias-primas para a fabricação e transporte de tais materiais para o local de construção; construção do objeto do estudo; consumo de energia durante a fase de utilização (demanda de serviços) do empreendimento, e a energia contida nos materiais e procedimentos de manutenção.

Os limites de análise de energia foram estabelecidos de acordo com os dados mais representativos da energia primária no inventário e seguindo a normatização para ACV e muitos elementos de baixa contribuição em energia foram excluídas da pesquisa.

O "ponto de corte" adotado para cada banco de dados foi estabelecido de acordo com a disposição no encontro de dados válidos e de relevância. A pesquisa constatou a necessidade de uma avaliação mais aprofundada dos dados obtidos para possível contribuição qualitativa que poderia oferecer, de acordo com a ISO 14040 (1997) e ISO 14041(1997) para aplicações

de ACV para construção civil. A maioria dos dados preliminares foram obtidos do banco de dados DEAM, ECOBILAN (2007), e Ecoinvent (2009), SIMaPRO (2008). As quantidades de materiais, que possibilitaram o levantamento de massa e posteriormente o de energia, foram definidas com base nas informações geradas pela planilha de orçamento do projeto. Estas informações geradas por planilha foram posteriormente corrigidas por meio de faturas de materiais fornecidos pelos levantamentos dos fabricantes e de campo, de forma a conferir uma maior precisão ao levantamento. As bases de dados brasileiras de energia foram obtidas a partir de levantamentos de campo e bancos de dados de fabricantes locais.

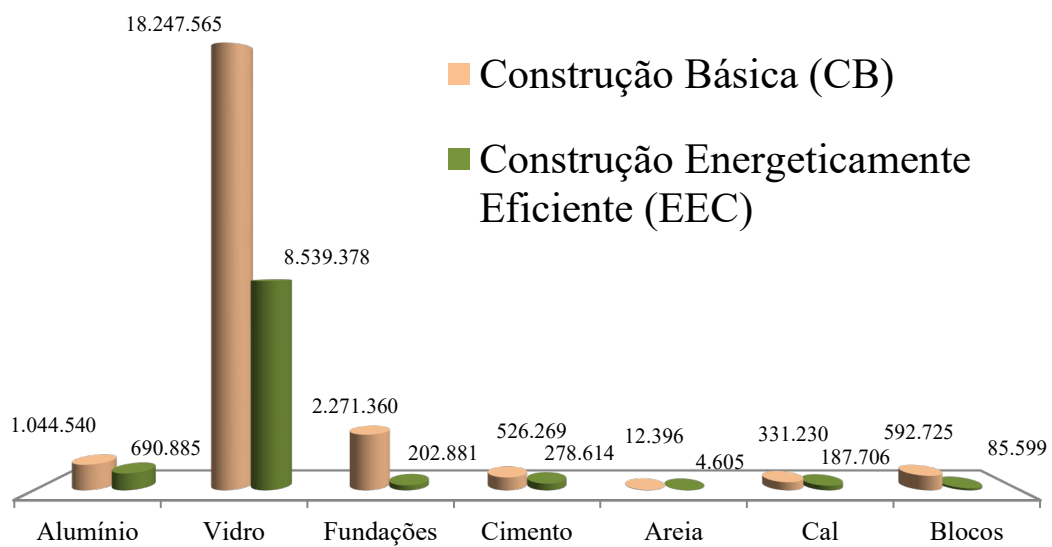
Após as primeiras análises realizadas seguindo o escopo da metodologia, e da consideração dos materiais especificados inicialmente na construção do projeto, algumas mudanças foram adotadas a fim de não só reduzir custos, mas também objetivando a redução do encargo energético associado ao projeto. Alterações também foram atribuídas à envoltória do edifício e ao sistema operacional de serviço com o mesmo objetivo. As principais alterações relacionadas com a especificação no aspecto da análise do ciclo de vida objetivaram: a eliminação de processos de serviço e a substituição de materiais com maior carga energética contida, por materiais que contribuem para esta redução, e a utilização de materiais com maior durabilidade. Este constituiu fator positivo durante a fase avaliada de manutenção e/ou substituição. No que concerne às interferências providas nas fachadas (envelope) do edifício, foram aumentadas as áreas de iluminação e de ventilação natural, de modo a reduzir a necessidade para o condicionamento de ar e iluminação artificial. Outra interferência na envoltória do edifício foi a eliminação do revestimento de argamassa em toda a fachada e que se estendeu as áreas internas, o que reduziu processos, economizou energia, e conseqüentemente, contribui positivamente na redução no impacto ambiental global do empreendimento. Foram realizadas intervenções também na fase de serviço: a eliminação da climatização artificial, e a utilização de equipamentos de iluminação mais eficientes, associado ao aumento da iluminação natural.

4.4 RESULTADOS E ANÁLISES

As Figuras 6 e 7 ilustram respectivamente os resultados comparativos de consumo de energia de alguns materiais básicos relevantes utilizados durante a fase de construção e os resultados comparativos de consumo total de energia incorporada. Em relação ao ciclo de vida, pode-se notar que na fase de construção, o cenário CEE resultou numa redução significativa no consumo de energia (47,62%), incluindo a extração de matérias-primas. As economias de

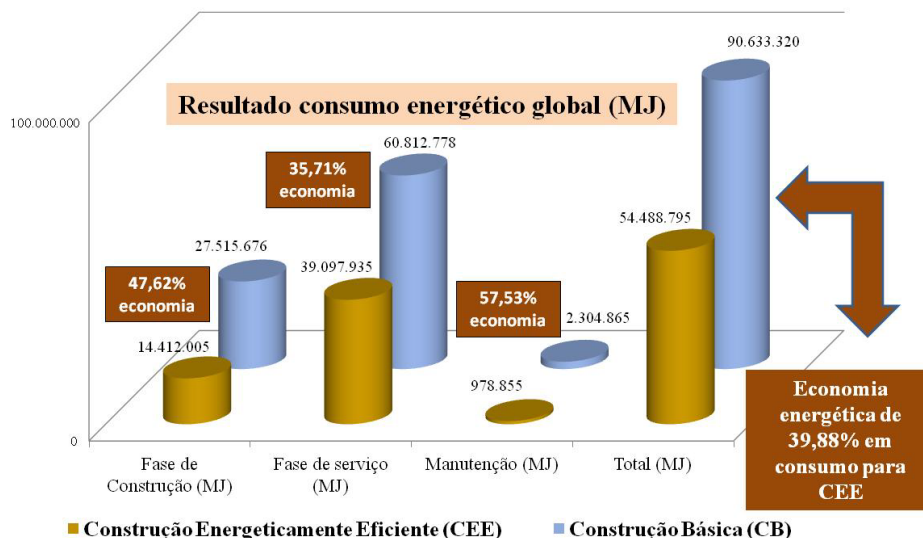
energia principais durante a fase de construção foram devido a mudanças nos materiais de fundação (economia de 2.068.479 MJ), alterações do material das paredes (economia nos blocos de 576.028 MJ), reduzindo o uso de vidro e alumínio (respectivamente; 9.708.186 MJ e 353.655 MJ); eliminações de revestimento interior e exterior, o que reduziu processos e materiais como: cal, areia, cimento, representando 143.524 MJ; 7.791 MJ e 247.654 MJ, respectivamente.

Figura 6 - Comparação energética dos materiais básicos principais



Fonte: Elaboração própria 2017.

Figura 7 - Resultado do consumo energético Global (MJ)



Fonte: Elaboração própria 2017.

A economia no consumo de energia na fase de serviço calculada para o cenário **CEE** foi de aproximadamente 35,71% da energia total consumida para **CB** ao longo do seu horizonte projetado de vida útil. Os resultados individualizados são mostrados por seção de serviço na Tabela 2.

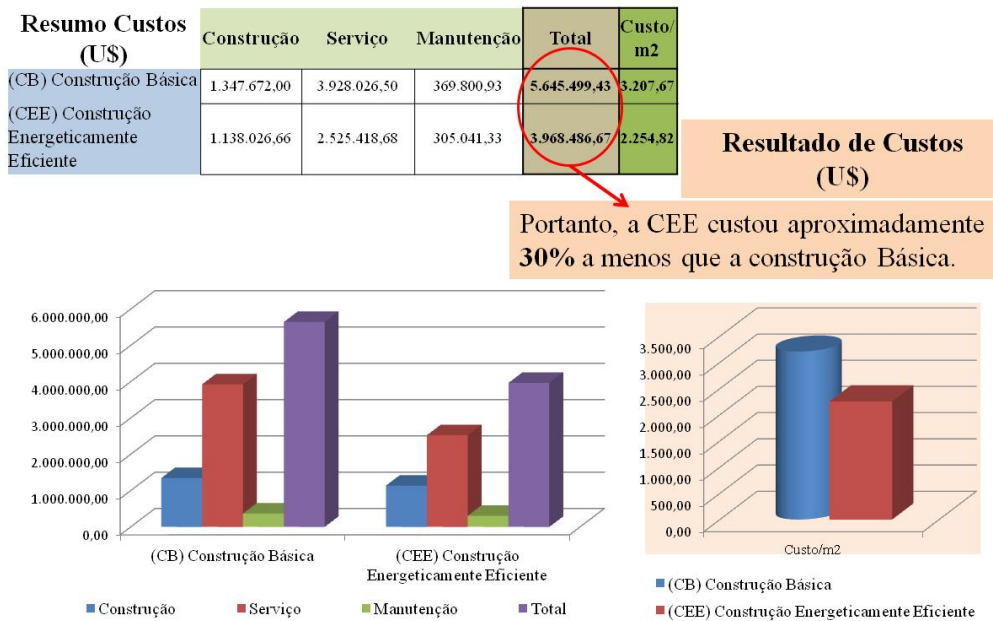
Tabela 2 - Comparação energética na fase de serviço

Descrição	Consumo de energia (CB) kWh	% Rel. Total	Consumo de Energia (CEE) kWh	% Rel. Total
Iluminação	1.474.704	8,73	1.179.763	10,86
Climatização	5.736.960	33,96	0	0,00
Informática	3.978.374	23,55	3.978.374	36,63
Equipamentos	5.702.400	33,76	5.702.400	52,51
	16.892.438	100%	10.860.538	100%

Fonte: Elaboração própria 2017.

Os resultados do inventário de energia para os procedimentos de manutenção de rotina, conforme estabelecido na base de dados de fabricantes e na literatura, apontam para um consumo de 2.304.865 MJ para **CB**, que é equivalente a cerca de 640.240 kWh, e de 978.854 MJ para **CEE**, o equivalente a 271.904 kWh. Isso significa 57,5% menos energia que seria necessária para a manutenção e reparação da unidade construída como **CEE** em relação ao cenário **CB**. Vale ressaltar que, como afirma o levantamento de dados, se menos energia e materiais mais duráveis são utilizados na construção, maior será a economia de energia ao longo dos anos. Embora num primeiro momento, a ideia geral é que ser sustentável pode resultar em um aumento dos custos de construção em geral, isso não é verdade absoluta. Para verificar a relação custo/sustentabilidade foram calculados os custos do projeto dividido em: custos de construção, custos de manutenção e custo no consumo de energia durante a fase de serviço. Os resultados são apresentados na figura 8 em valores indexados pelo dólar americano.

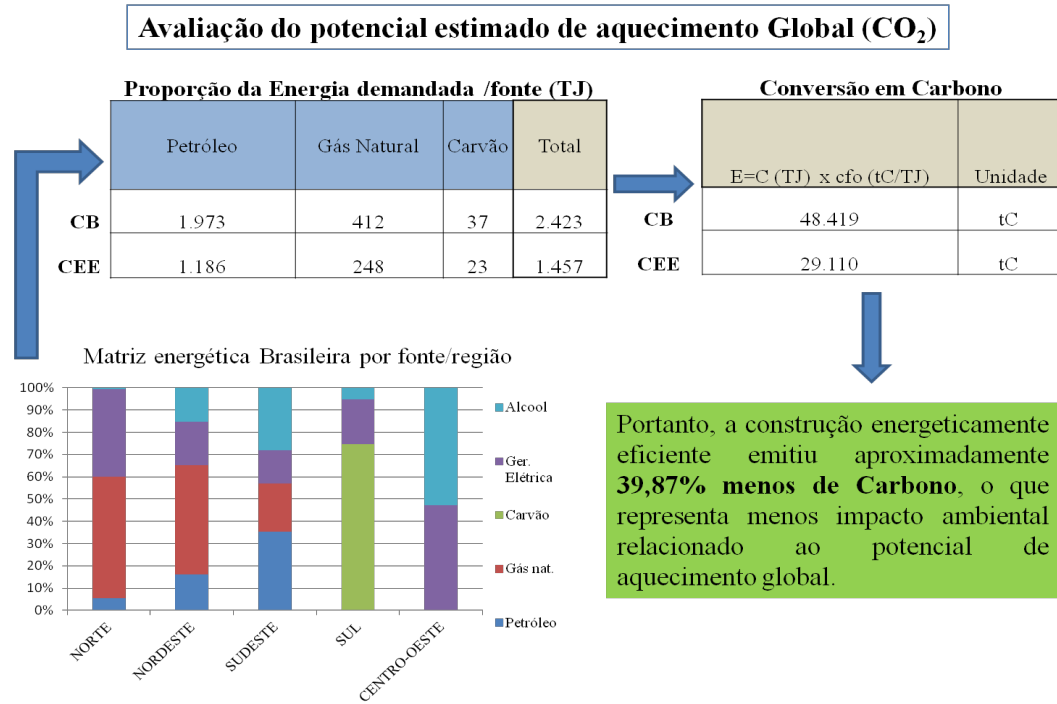
Figura 8 - Resultado de avaliação dos custos (US\$)



Fonte: Elaboração própria 2017.

A economia global para **CEE** apresentada foi de 29,71% nos custos Globais. O valor em US\$/m² para as duas hipóteses foram, respectivamente, para o **CB** e **CEE**, US\$ 3.207,67/m² e US\$ 2.254,82/m², constituindo índices de custos para avaliação e comparação, considerando um horizonte de vida útil projetado para 75 anos. Os resultados finais obtidos permitiram a construção de índices de consumo de energia por metro quadrado para o projeto considerado como um estudo de caso. Para a hipótese construtiva básica (**CB**), a taxa de energia contida por metro quadrado foi de 51,5 GJ/m², enquanto que para (**CEE**) foi 30,96 GJ/m². Devido a esta redução no consumo energético e com base na configuração da matriz energética brasileira estimou-se que a construção energeticamente eficiente emitiu aproximadamente **39,88% menos de Carbono**, o que representa menos impacto ambiental relacionado ao potencial de aquecimento global conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Resultados de emissão de carbono equivalente



Fonte: Elaboração própria 2017.

A geração de um índice de consumo de energia por metro quadrado de área construída é de fundamental importância por vários aspectos, tais como consumo de energia e impacto ambiental. A contabilização dos custos de energia pode ser relacionada com o custo projetado final de construção. Podem ser feitas comparações com outras formas de empreendimento e o resultado pode ser usado como uma ferramenta de gestão. As projeções de consumo de energia em escala podem ser mais precisas a partir desta metodologia. O sector da construção é uma mola mestra da economia e a oferta de energia é uma preocupação constante em qualquer economia. Informações resumidas por índices de consumo de energia podem ser relacionadas a questões socioeconômicas.

No estudo realizado por Scheuer et al. (2003, p. 1049-1064) da Universidade de Michigan campus, a fase que compreende os serviços de água e a substituição de materiais utilizou cerca de 97,7% do total da energia gasta durante a construção. O transporte de materiais representou 2,2%. Neste presente trabalho realizado no campus da UFBA, a fase de serviço representou 73,55% da energia contemplando a substituição dos materiais ao longo da sua vida útil. A fase de construção, produção e transporte de materiais representaram 26,45% do total de energia durante a vida útil do projeto. Este fato pode ser explicado pela maior demanda de energia para aquecimento e arrefecimento do edifício da Universidade de Michigan, que representou os maiores percentuais de impacto ambiental associado ao consumo de energia,

principalmente devido a grandes variações térmicas. Por isso, é provável que, para países localizados em zonas climáticas com estações mais regulares, baixas flutuações na temperatura, e clima mais ameno, as diferenças no consumo de energia entre estas duas fases tendam a ser mais baixas.

A intervenção sobre o resultado da eficiência energética na fase de serviço está diretamente relacionada à concepção do projeto, design e funcionalidade para o fim a que este está designado. Assim, uma boa especificação de materiais e adequadas decisões tomadas na fase de projeto, podem trazer ganhos significativos na redução na demanda de energia durante a vida útil do projeto. Esta condição é também corroborada pelo trabalho de Scheuer et al. (2003, p. 1049-1064).

A escolha de não execução das vias de acesso para atender o edifício construído no laboratório do campus da universidade contribuiu para a redução, local e globalmente, a geração de encargos. A consideração mencionada ainda no planejamento do projeto, possibilitou a escolha do local para implantação do edifício e a integração à estrutura já existente de estradas de acesso no campus. A influência deste fator foi medida na obra de Li (2006, p. 1414-1422), onde esta variável foi quantificada, juntamente com a interferência e as considerações em relação aos impactos locais durante a execução do projeto. Foi também destacado, e refletido neste presente trabalho, que é importante a escolha de materiais de construção e a incorporação na consideração de energia que é usada durante o transporte de materiais e recursos similares.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da aplicação da metodologia de ACV proposta para este estudo quando comparada à estudos anteriores envolvendo construção civil com a mesma abordagem, mostram que prevaleceu um consumo mais representativo na fase de serviço. Contudo, é possível verificar que principalmente relacionada a fase de serviço da edificação, os valores do consumo energético sofrem grande influência das zonas climáticas e das oscilações nas variações térmicas. Isto porque a curva de demanda energética aumenta significativamente com a utilização da climatização artificial. Quanto maiores as variações térmicas, maior será o encargo energético associado a regulação da temperatura ambiente. Como é na fase de serviço que se dá o maior consumo energético, o foco na eficiência energética deve ser direcionado para a energia consumida durante a utilização do empreendimento, especialmente em edifícios onde o consumo de energia nesta fase referida é alto. A redução da ineficiência energética nesta fase, irá influenciar com maior alcance a contribuição relativa total dos custos de energia e

ambientais, do que durante as fases de produção e construção, que são mais relacionados aos impactos locais. Embora esta análise não seja completa, pois excluiu-se a fase de demolição, a peculiaridade de ter sido desenvolvida durante o processo de construção, atribui um diferencial positivo em relação a outros trabalhos de ACV global. A possibilidade de obtenção de inventário detalhado de materiais e processos com o construtor, inerentes ao controle da aplicação durante o desenvolvimento do trabalho, possibilitou uma maior precisão para os dados. Outro aspecto relevante deste trabalho foi a possibilidade de produção de bases de dados próprias de energia, contida nos materiais e processos, e que refletem a realidade brasileira. Esta contribuição é de fundamental importância no sentido de prover informação qualitativa e de ampliar o ainda deficitário banco de dados energéticos para materiais e processos de construção brasileiro.

O presente trabalho é uma contribuição para a indústria da construção, levantando questões sobre as suposições anteriores relacionadas com o comportamento real do setor no que diz respeito à sustentabilidade, haja visto que provou ser possível obter melhorias ambientais sem necessariamente implicar no aumento de custos. De forma contrária ao padrão de resultados esperados, conseguiu obter redução de custos ao passo que reduziu os impactos, demonstrando assim que é viável economicamente a aplicação de soluções mais sustentáveis para o setor. A sugestão de melhorias no controle e medição de consumo de energia relacionado a produtos e processos, através do desenvolvimento de metodologia de aplicação prática, proporcionou a possibilidade de utilização de ferramenta de análise que pode ser utilizada também como instrumento de gestão por parte do poder público em busca do desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

DE CARVALHO, A. C. V.; GRANJA, A. D.; DA SILVA, V. G., A Systematic Literature Review on Integrative Lean and Sustainability Synergies over a Building's Lifecycle. **Sustainability**, 2017, v. 9, n. 7, p. 1156.

ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN (AIJ): Guidelines for LCA of buildings. Maruzen Publishing Division, 2003. p. 7-33.

BUCHANAN, A.; HONEY, B. Energy and carbon dioxide implications of buildings constructions. **Energy and Buildings**, v. 20, 1994. p. 205-217.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION: **Energy efficiency standards for residential and nonresidential buildings**. Sacramento: California Energy Commission, 2001 p. 166.

CASALS, X. G. Analysis of building energy regulations and certification in Europe: Their role, limitations and differences. In: *Energy and Buildings*, Oxford: Elsevier, 2006. v. 38, p. 381-392.

CHAU, C. K.; BURNETT, J.; LEE, W. L. Assessing the cost effectiveness of an environmental assessment scheme. In: *Building and Environment*. Oxford: Pergamon, 2000. v. 35, p. 307-320.

DEBNATH A.; SINGH S. V.; SINGH Y. P. Comparative assessment of energy requirements for different types of residential buildings in India. **Energy and Buildings**, v. 23. p. 141-146, 1995.

DORSTHORST, B.J.H; HENDRIKS, Ch. F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. In: *CIB Symposium: Construction and Environment - theory into practice*, São Paulo, 2000. **Proceedings [...]**. São Paulo, EPUSP, 2000.

EATON, K. J.; AMATTO, A. A comparative life cycle Assessment of steel and concrete framed office buildings. **Journal of Constructions Steel**. Research, v. 46, n. 1-3, p. 286-287, 1998.

ECOBILAN, P.; TEAM/DEAM; ECOBILAN. PriceWaterhouseCoopers, Bethesda, MD, 2007.

ECOINVENT v 2.1. Swiss Centre for life Cycle Inventory. 2009. ISBN 3-905594-38-2.

ERLANDSSON, M.; BORG, M. Generic LCA-methodology applicable for building, construction and operation services-today practice and development needs. **Build and Environment**, n. 38, v. 7, p. 919-938, 2003.

FURTADO, J. S. **Atitude ambiental sustentável na Construção Civil: ecobuilding e produção limpa**. Disponível em: <http://www.vanzolini.org.br/areas/desenvolvimento/producaolimpa>. Acesso em: 21 jul. 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Diretoria de pesquisas, Coordenação de contas nacionais, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY- IEA. **The 2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector**. 2019. ISBN 978-92-807-3768-4.

ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization, 1997.

ISO 14401. Environment Management - Life Cycle Assessment - Goal and Scope Definition and Inventory Analysis. International Organization for Standardization, 1997.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO RECICLAGEM DE RESÍDUOS DOMICILIARES, São Paulo. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acesso em: 2 ago. 2003.

KIPERSTOK, A.; COELHO, A.; TORRES, E. A.; MEIRA, C.C.; BRADLEY, S. P.; ROSEN, M. **Prevenção da poluição**. Brasília: SENAI/DN, 2002.

KIRK, S. J.; DELL'ISOLA, A. J. **Life Cycle Costing for Design Professionals, second edition**. New York: McGraw-hill, 1995. p. 262.

LI, Z. A new life cycle impact assessment approach for buildings. **Building and Environment**, n. 41, p. 1414-1422. 2006

LOMARDO, L. L. B.; Rosa L. P. The Brazilian energy crisis and a study to support building efficiency legislation. **Energy and Buildings**, n. 36, p. 89-95, 2004.

MARTINEZ, A. G., **Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de Edificios**: Propuesta metodológica para la elaboración de Declaraciones Ambientales de Viviendas en Andalucía. 2010. 495 f. Tese (Doutorado) - Universidad de Sevilla, Chalmers University of Technology, Sevilla, 2010.

NAKAO, J. E. H. Comparação do potencial de aquecimento global de um mesmo edifício em diferentes cenários. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DE CICLO DE VIDA EM PRODUTOS E SERVIÇOS, 2., 2010, Florianópolis. **Anais [...]**. Santa Catarina: UFSC, 2010.

NASCIMENTO, L. B. P. do. Influência de variáveis construtivas e de uso de equipamentos e ocupação no consumo de energia em edifícios de escritório localizado em Londrina-PR. 2010.

OKA T.; SUZUKI, M.; KONNYA, T. The estimation of energy consumption and amount of pollutants due to the construction of buildings. **Energy and buildings**, n. 19, p. 303-311, 1993.

ORDENES, M.; MARINOSKI, D. L.; BRAUN, P.; RUTHER, R. The Impact of building-integrated photovoltaic on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. **Energy and Buildings**, n. 39, p. 629-642, 2007.

PINTO, T. P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

Pre Consultants; SIMaPRO 7.01 v, 2008.

RODRIGUES, C. R. B.; ZOLDAN, M. A.; LEITE, M. L. G.; OLIVEIRA, I. L. Sistemas computacionais de apoio a ferramenta análise de ciclo de vida do produto (ACV). *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2008.

SCHEUER C.; KEOLEIAN, GREGORY A.; REPPE, P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. **Energy and Buildings**, n. 35, p. 1049-1064, 2003.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. International Energy Outlook - IEO 2019. U.S Energy Information Administration, Washington, DC. September, 2019.

VENKATARAMA REDDY, B. V.; JAGADISH K, S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy and Buildings**, n. 35. p. 129-137, 2001.

VERRIER, B.; ROSE, B.; CAILLAUD, E.; REMITA, H. Combining organizational performance with sustainable development issues: The Lean and Green project benchmarking repository. **J. Clean. Prod.** 2014, n. 85, p. 83-93.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT- WBCSD. Eficiência energética em edifícios - Realidades empresariais e oportunidades. Relatório síntese, edição portuguesa, WBCSD, 2007.

MINI CURRÍCULO E CONTRIBUIÇÕES AUTORES

TÍTULO DO ARTIGO	AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA: ESTUDO DE CASO APLICADO A CONSTRUÇÃO CIVIL
RECEBIDO	02/09/2020
AVALIADO	01/10/2020
ACEITO	05/10/2020

AUTOR 1	
PRONOME DE TRATAMENTO	Dr.
NOME COMPLETO	Maurício Andrade Nascimento
INSTITUIÇÃO/AFILIAÇÃO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA
CIDADE	Salvador
ESTADO	Bahia
PAÍS	Brasil
LINK LATTES	http://lattes.cnpq.br/0226861258633206
RESUMO DA BIOGRAFIA	Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Bahia (1994), mestre em Tecnologias Limpas pela Universidade Federal da Bahia (2005), e doutor em Energia e Ambiente pela UFBA (2011). Atualmente atua como docente no IFBA, como consultor, coordenador de pesquisa e gestor, na área de construção e incorporação de empreendimentos objetivando a sustentabilidade, além de atuar como docente universitário. Em paralelo a sua carreira profissional no segmento de engenharia, participa ativamente do meio acadêmico ministrando palestras, participando de congressos, projetos de pesquisa e atuando como professor em cursos de pós-graduação e graduação nas áreas de construção, energia e meio ambiente. Vencedor do prêmio Bahia Ambiental em 2005 na categoria Mestrado, tendo sido contemplado por bolsa da CAPES enquanto participante de linha de pesquisa na Universidade Federal da Bahia onde atuou como coordenador na realização de empreendimento sustentável. Possui amplo conhecimento do setor de construção civil e áreas afins. Tem ampla experiência na gestão e construção no campo de engenharia civil, com ênfase em energias renováveis, eficiência energética, construção enxuta, meio ambiente e sustentabilidade.
CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES NO ARTIGO	Autor principal do artigo.
AUTOR 2	
PRONOME DE TRATAMENTO	Dr.
NOME COMPLETO	Ednildo Andrade Torres
INSTITUIÇÃO	Universidade Federal da Bahia - UFBA
CIDADE	Salvador
ESTADO	Bahia
PAÍS	Brasil
LINK LATTES	http://lattes.cnpq.br/2483185411923070
RESUMO DA BIOGRAFIA	Coordenador do Laboratório de Energia e Gás (LEN), da Escola Politécnica da UFBA, com pós-doutorado na FAMU/FSU US, doutor em Energia pela Unicamp, mestre pela Universidade de São Paulo/Escola Politécnica, graduação na Universidade Federal da Bahia. Foi chefe por dois períodos do Departamento de Engenharia Química/UFBA, possui mais de 35 anos de experiência na área de desenvolvimento tecnológico entre centros de pesquisa industriais e universidades. É membro titular da Academia de Ciências da Bahia, foi vice coordenador do INCT Energia e Ambiente, com sede na UFBA. foi coordenador da área de desenvolvimento tecnológico e empreendedorismo da UFBA por 06 anos, foi diretor presidente do Instituto de Energia e Ambiente do Estado da Bahia, foi coordenador do Centro de Energia e Ambiente da UFBA (CIENAM) por 8 anos,

	<p>coordenou o programa de pós-graduação e energia e ambiente (doutorado) por dois períodos. Em 2008 foi o presidente da comissão organizadora do V CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, realizado em Salvador de 25 a 28 de agosto de 2008. Orientou mais 44 alunos de mestrado mais de 20 de doutorado e cerca de 200 alunos de iniciação científica, mais de 30 alunos de especialização. Atualmente orienta 05 alunos de mestrado e 10 de doutorado. Publicou mais de 200 trabalhos em anais de eventos, mais de 90 artigos em periódicos, além de 03 livros, 05 capítulos de livro, textos em jornais e revistas, tem mais de 10 produtos tecnológicos, e diversas apresentações em congressos nacionais e internacionais. Seus alunos ganharam os Prêmios Tecnológicos Bahia Ambiental 2004 e Petrobrás da Rede Gás-energia de 2004. Em 2006 ganhou o prêmio pesquisador inovador do ano concedido pela FAPESB, melhor dissertação de mestrado 2014, CAPES-VALE, menção honrosa prêmio CAPES 2018 doutorado. Tem ou teve convênios com empresas de penetração nacional e internacional tais como Braskem, Monsanto, Griffin, Caraíba Metais, Petrobras, Politeo, Petrobahia, Bahia Gás. É coordenador de diversos projetos de P&D com financiamento das agências CNPQ, FINEP, FAPESB, Petrobras/ANP etc.</p>
<p>CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES NO ARTIGO</p>	<p>Coautor do artigo</p>

<p>Endereço de Correspondência dos autores</p>	<p>Autor 1: IFBA - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia/Engenharia Civil Rua Emídio dos Santos, s/n - Barbalho, Salvador - Bahia - Brasil - CEP: 40301-015 nascimento.mauricioandrade@gmail.com</p> <p>Autor 2: Universidade Federal da Bahia/Escola Politécnica/TECLIM/CIENAM/LEN Rua Aristides Novis, 2 - Federação - Salvador - Bahia - Brasil - CEP: 40210-630 ednildo@ufba.br</p>
--	---