XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Arnulfo Barroso de Vasconcellos	Teresa Irene Ribeiro de Carvalho Malbeiro	Fernando Novelo
Universidade Federal de Mato Grosso	Universidade Federal de Mato Grosso	Universidade Federal de Mato Grosso
arnulfo@ufmt.br	malheiro.teresa@gmail.com	fernando_novelo@hotmail.com

Cleverson Sousa Camargo	Luciana Oliveira da Silva
Universidade Federal de Mato Grosso	Universidade Federal de Mato Grosso
cleverson.camargo@live.com	xtialu@yahoo.com.br

Análise da Eficiência Energética e Qualidade de energia em uma Edificação Climatizada por Resfriadores Evaporativo Versus Condicionador de Ar Convencional

Palavras-chave

Conversores de Frequência
Eficiência Energética
Energyplus
Filtros Sintonizados Passivos
Qualidade da Energia
Simulação Computacional

Resumo

O presente artigo tem como objetivo analisar o consumo de energia elétrica, a demanda de potência ativa solicitados por uma edificação climatizada através do sistema de resfriamento evaporativo acionado por inversores de frequência em comparação com o sistema de climatização convencional que utiliza condicionadores de ar. O nível de distorção harmônica de tensão no barramento do sistema elétrico da edificação na presença de resfriadores evaporativos acionados por conversores de frequência também foi analisado, sendo considerado a aplicação de filtros passivos sintonizados com o objetivo de diminuir os níveis de distorções harmônicas de tensão no barramento em estudo. A edificação é retratada no software Energyplus que leva em consideração as características físicas da edificação, tais como dimensões, espessura e cor da parede, tipo de cobertura, número de ocupantes no ambiente, condições climáticas da região, etc.

Através da simulação de um caso real, são analisados os valores das faturas de energia elétrica da edificação climatizada gerada pelos dois sistemas. A análise econômica é efetuada através da comparação dos respectivos tipos de climatização. Nesse contexto, o artigo retrata os resultados da aplicação dos dois métodos para esta edificação que constitui um local para eventos sociais.

1. Introdução

A eficiência energética está relacionada diretamente com o uso racional da energia, que tem como premissa sua melhor utilização. Esse conceito é previsto na lei nº 10.295, onde o poder executivo estabelece níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País.

No Brasil, o consumo de energia elétrica nas edificações corresponde a cerca de 45% do consumo faturado no país. Essa energia é consumida na operação e manutenção das edificações e nos sistemas artificiais que proporcionam conforto ambiental para seus usuários, como iluminação, climatização e aquecimento de água.

Atualmente, a eficiência energética aplicada às edificações propõe a integração dos elementos arquitetônicos ao meio-ambiente do entorno e às necessidades dos usuários. Atende à demanda energética da edificação pelo uso dos recursos naturais e de equipamentos elétricos eficientes, a fim de reduzir o consumo e evitar o desperdício. A simulação computacional é uma poderosa ferramenta que permite analisar a redução do consumo de energia elétrica proveniente da alteração do sistema de climatização e/ou adequação estrutural da edificação. Para as simulações da eficiência energética, utilizou-se o software Energyplus, que é um programa computacional, criado a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Foi desenvolvido para simulação de carga térmica, consumo de energia elétrica ativa, estimativa de demanda de potência ativa, enquadramento tarifário mais adequado e análise energética de edificações e seus sistemas, além de integrar vários módulos que trabalham juntos para calcular a energia requerida para aquecer ou resfriar um edifício usando uma variedade de sistemas e fontes de energia. Este programa faz isso simulando o edifício e os sistemas associados em diferentes condições ambientais e operacionais. Por meio do Plug-in OpenStudio, o SketchUp, programa de criação de maquetes eletrônicas em 3D, é integrado ao Energyplus, o que possibilita a edição e visualização em 3D da edificação simulada.

Em relação à qualidade da energia elétrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores sempre foi objeto de interesse e investigação. Todavia, até algum tempo atrás, a qualidade da energia estava relacionada, sobretudo, com a continuidade dos serviços prestados através da análise dos indicadores DEC, FEC, DIC e FIC. Com o desenvolvimento da eletrônica, os equipamentos ligados aos sistemas elétricos evoluíram, melhorando em rendimento, controle, economia de energia e custo, permitindo ainda a execução de tarefas não possíveis anteriormente. Contudo, esses equipamentos têm a desvantagem de possuir características não lineares, isto é, provocam a distorção das formas de onda de corrente e tensão do sistema e “injetam” nos circuitos secundários de distribuição das concessionárias de energia correntes com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, as chamadas frequências harmônicas.

A presença de harmônicas nos sistemas de potência resulta em um aumento das perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia elétrica, criando problemas de interferência com sistemas de comunicação e na degradação do funcionamento da maior parte dos equipamentos ligados à rede, sobretudo daqueles (cada vez em maior número) que são mais sensíveis por incluírem sistemas de controle microeletrônicos que operam com níveis de energia muito baixos. Normas internacionais relativas ao consumo de energia elétrica tais como IEEE 519 [1], IEC 61000 e EN 50160, limitam o nível de distorção harmônica de tensão com os quais os sistemas elétricos podem operar e impõem que novos equipamentos não introduzam harmônicos de corrente na rede de amplitude superior a determinados valores. É assim evidenciada a importância em resolver os problemas dos harmônicos, tanto para os novos equipamentos a ser produzidos quanto para os equipamentos já instalados.

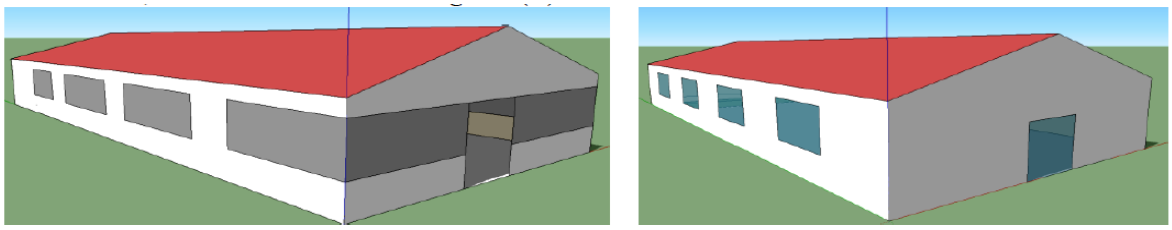
No Brasil, a preocupação com a qualidade da energia elétrica é uma questão que está posta, haja vista o empenho dos órgãos reguladores (ANEEL), as concessionárias e os consumidores. A ANEEL através dos

procedimentos de distribuição (Prodist), publicado em Dezembro/2008 em seu módulo 8, trata da qualidade de energia elétrica no que tange ao serviço e produto em âmbito nacional.
Consoante o anteriormente exposto, este trabalho apresenta os resultados de medições em campo e os alcançados com a simulação computacional, por meio do software Energyplus, de uma edificação utilizada para fins sociais, analisando-se a eficiência energética do sistema de climatização composto por resfriadores evaporativos, acionado por conversor de frequência, versus sistema de climatização composto por condicionadores de ar convencionais, bem como a adequação física da edificação visando uma maior eficiência energética e a qualidade da energia elétrica do sistema de resfriadores evaporativos acionados por conversores de frequência.

2. Desenvolvimento

2 Descrição da Edificação e dos Sistemas de Refrigeração

A edificação estudada é um salão utilizado para fins sociais localizado em Cuiabá-MT. Possui paredes de alvenaria com aberturas cobertas por lonas removíveis. A cobertura é composta por telhas ecológicas de Tetra Pak, forro em PVC e sem portas, ilustrada na Figura 1(A).
O processo de adequação física da edificação consistiu na colocação de janelas e porta de vidro, completando os fechamentos com parede de alvenaria, conforme o ilustrado na Figura 1(B).



(A) Edificação antes da adequação física. (B) Edificação após adequação física.
Figura 1. Maquete eletrônica da edificação utilizada para fins sociais.

O sistema atual de climatização é composto por três conjuntos de resfriadores evaporativos, acionados por conversor de frequência. O conversor de frequência do sistema estudado alimenta três motores de 1/2 CV, responsáveis pela velocidade das hélices dos resfriadores. Integrante ao sistema há três motobombas de 1/6 CV, acionadas em partida direta, utilizadas para o bombeamento de água no sistema. Segundo medições realizadas em campo, identificou-se que o sistema de resfriamento evaporativo operando na frequência de 30Hz manteve o conforto térmico da edificação. A tabela 1 apresenta os dados técnicos do sistema de climatização composto pelos resfriadores evaporativos acionados pelo conversor de frequência.

Tabela 1 – Dados técnicos dos resfriadores evaporativos e conversor de frequência.

	Motobomba	Ventilador
Potência	1/6 CV	1/2 CV
Rotação	3500 RPM	3500 RPM
Nº de Polos	02	02
Tensão de Alimentação	220/380/440 V Trifásico	220/380/440 V Trifásico
Frequência	50/60 Hz	50/60 Hz
Conversor de Frequência		
Alimentação	200-240 Trifásico	
In (Saída)	7,3A	
Fabricante	Weg	
Modelo	CFW100073T2024POCPZ	

O resfriamento evaporativo opera utilizando fenômenos naturais através de processos induzidos nos quais a água e o ar são os fluidos de trabalho. Consiste na utilização da evaporação de água através da passagem de um fluxo de ar, provocando uma redução na temperatura do ar. Esse processo possui como principal característica o fato de ser mais eficiente quando as temperaturas são mais elevadas, ou seja, quando a necessidade de resfriamento é maior para o conforto humano.

2.1 Estimativa da fatura de energia elétrica da edificação através de equações matemáticas relativas

à Tarifa B1

Para fazer a estimativa de consumo de energia elétrica ativa e demanda de potência ativa da edificação foi realizado o levantamento das cargas instaladas mais significativas presentes no local e que estão descritas a seguir.

2.1.1 Cálculo do Consumo de Energia Elétrica (CA)

O Sistema de Resfriamento Evaporativo (SRE) instalado é um BRISbox, modelo Bb100, com vazão de ar de 10.000 m3/h que possui uma demanda de potência ativa de 1.611,26W, para a frequência ótima de 30Hz, segundo medições em campo. O sistema de iluminação é composto por 30 luminárias com um reator eletrônico, de alto fator de potência, e duas lâmpadas fluorescentes, com potência total de 72W cada luminária, totalizando uma demanda de potência ativa de 2.160W. A potência dos demais equipamentos elétricos totaliza 1000W. A Tabela 2 mostra o consumo mensal de energia elétrica e a demanda de potencia ativa por sistema, considerando que cada sistema funcione durante 30 dias por mês e 6 horas por dia.

Tabela 2 – Consumo de Energia Elétrica (CA) e Demanda de Potência Ativa

Sistema	Demanda de Potência Ativa (D_{PA})	Consumo Mensal (CM) $CM = D_{PA} \times 6horas \times 30\ dias$
Resfriador Evaporativo	1,611kW	289,98kWh/mês
Iluminação	2,160kW	388,80kWh/mês
Demais Equipamentos	1,000kW	180,00 kWh/mês
Total	**4,771kW**	**858,78kWh/mês**

2.1.2 Cálculo do Faturamento da Edificação na Tarifa Convencional B1

A edificação analisada é considerada uma unidade consumidora enquadrada na modalidade tarifária convencional B1. O cálculo do valor do faturamento da edificação é obtido pela Equação 1. O valor em reais da energia medida em kWh foi obtido na Resolução Homologatória ANEEL nº 1270, de 03 de abril de 2012, em vigor desde 08 de abril de 2012, referentes à tarifa convencional B1.

$$Fatura\ B1 = \left(CM_{Total} \times Tarifa\right) \times \frac{1}{\text{Alíquota}}$$

$$Fatura\ B1 = (858{,}78kWh \times 0{,}42359R\$/kWh) \times \frac{1}{0{,}7} \quad (1)$$

$$Fatura\ B1 = R\$519{,}67$$

Para o levantamento do consumo de energia elétrica ativa e da demanda de potência ativa, o mais próximo possível do real, é preciso instalar um medidor de energia elétrica na edificação que realize a medição de um ciclo completo de faturamento, em torno de 30 dias.

2.2 Estimativa da Fatura de Energia Elétrica E Comportamento Térmico Interno Da Edificação Através do Software Energyplus.

2.2.1 Características do Energyplus

O programa Energyplus possui capacidade de simulação diferenciada, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas (fotovoltaico, aquecimento solar, etc...), além de possuir algumas características que o colocam à frente de diversos programas de simulações termo energéticas.

Além disso, o programa Energyplus integra vários módulos que trabalham juntos para calcular a energia requerida para aquecer ou resfriar um edifício usando uma variedade de sistemas e fontes de energia. Ele faz isso simulando o edifício e os sistemas associados em diferentes condições ambientais e operacionais. A essência da simulação está no modelo do edifício que utiliza princípios fundamentais de balanço energético.

2.2.2 Fatura de Energia

Para fins de simulação computacional analisou-se a edificação com funcionamento o mais próximo do real, considerando uma ocupação média de 200 pessoas, carga de iluminação de 2.160W, carga de equipamentos de 1.000W, e durante o horário mais crítico de funcionando, que é das 10 às 16 horas, sete dias por semana. As características físicas da edificação foram preservadas para as simulações antes do processo de

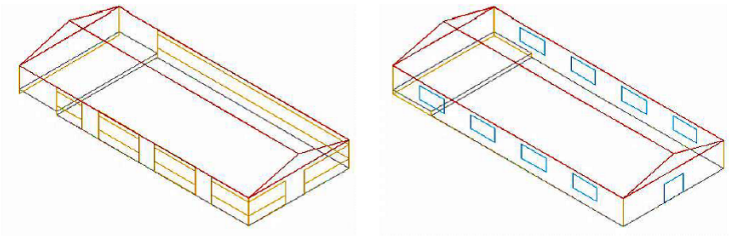
adequação física. O termostato do sistema de refrigeração foi configurado para a temperatura de 25°C. Utilizou-se o arquivo de dados climáticos de Cuiabá-MT, cidade que apresenta condições climáticas caracterizadas por duas estações bem definidas, sendo uma seca e outra chuvosa, ventilação fraca, sendo predominantemente quente durante o ano todo.

Visando uma maior eficiência, foram realizadas adequações físicas na edificação que consiste basicamente na colocação de janelas e porta de vidro. Desta forma uma maior parte da iluminação natural foi aproveitada, de forma que 1/3 das luminárias deixaram de ser acionadas durante a utilização da edificação. A Tabela 3 ilustra as características térmicas dos materiais utilizados para a simulação.

Tabela 3 - Características térmicas dos materiais.

Material	Condutividade Térmica (W/mK)	Calor Específico (J/kgK)
Concreto	1,75	1000
Forro PVC	0,19	0,0001
Lona PVC	0,19	0,0001
Reboco	1,15	1000
Telha Reciclada	0,06	0,0001
Tijolo Cerâmica	1,31	0,0001
Vidro	1,75	1000

A Figura 2 mostra o desenho das superfícies construídas no Energyplus, que retratam geometricamente a edificação antes e após o processo de adequação física.



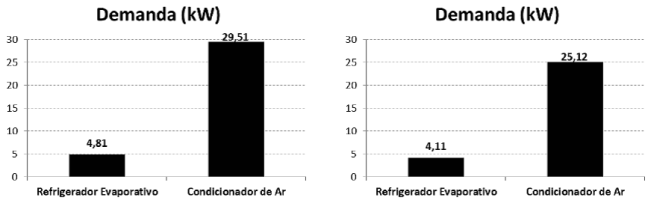
(A) Edificação antes da adequação física. (B) Edificação após adequação física.

Figura 2. Desenho das superfícies da edificação simulada no *Energyplus*.

Foi realizada a modelagem da edificação com seus ocupantes, equipamentos e rotinas de funcionamento no Energyplus. A climatização do ambiente foi modelada para dois sistemas distintos, compostos por resfriadores evaporativos e por condicionadores de ar. Cada sistema de climatização foi modelado separadamente, de forma a manter suas características, permitindo a análise do consumo de energia elétrica da edificação quando da utilização de cada sistema de climatização.

O programa Energyplus simula o consumo de energia elétrica e demanda de potência ativa da edificação em relação às estações do ano, considerando as características climáticas da região, com resultados obtidos mais próximos de um sistema real.

A Figura 3 apresenta os valores da demanda da edificação para cada sistema de climatização adotado. Verifica-se que o sistema de resfriadores evaporativos apresenta uma demanda cerca de seis vezes menor que a do sistema de condicionadores de ar.

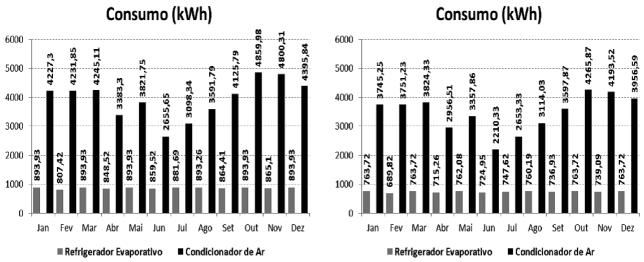


(A) Edificação antes da adequação física. (B) Edificação após adequação física.

Figura 3. Demanda da edificação.

A Figura 4 mostra o gráfico de barras do consumo mensal da edificação para cada sistema de climatização. O consumo do sistema composto por resfriadores evaporativos apresenta-se praticamente constante para os meses do ano, enquanto o composto por condicionadores de ar apresenta variações decorrentes de sua maior

ou menor utilização.



(A) Edificação antes da adequação física. (B) Edificação após adequação física.

Figura 4. Consumo da edificação.

O programa utilizado para a simulação no Energyplus foi configurado para fornecer em seu relatório o valor do consumo anual de energia elétrica da edificação analisada, para cada sistema de climatização, sem os impostos, para a tarifa convencional B1. A Equação 2 permite determinar o valor final da fatura de energia elétrica.

$$\text{Fatura Total Anual} = \text{Fatura Parcial Anual} \times \frac{1}{0{,}7} \qquad (2)$$

A Tabela 4 ilustra a fatura parcial anual e a fatura total anual do consumo anual de energia elétrica para cada sistema.

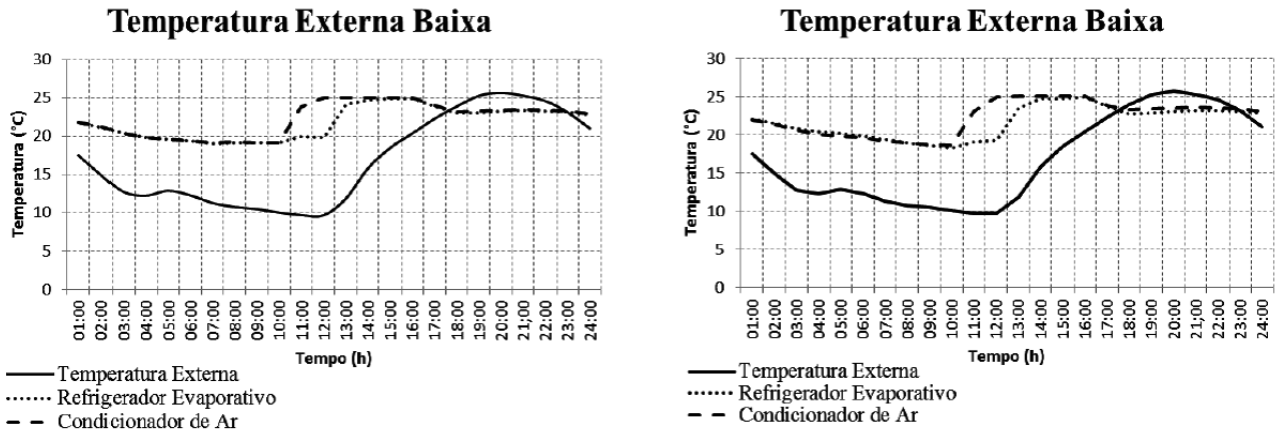
Tabela 4 - Fatura Total Anual de Energia Elétrica da Edificação

	Sem Adequações Físicas		Com Adequações Físicas	
Sistema	**Fatura Parcial Anual de Energia Elétrica (sem impostos)**	**Fatura Total Anual de Energia Elétrica (com os impostos)**	**Fatura Parcial Anual de Energia Elétrica (sem impostos)**	**Fatura Total Anual de Energia Elétrica (com os impostos)**
Resfriador Evaporativo	R$ 4.443,29	R$ 6.347,56	R$ 3.783,01	R$ 5.404,30
Condicionador de Ar	R$ 20.093,84	R$ 28.705,49	R$ 17.632,66	R$ 25.189,51

Do ponto de vista econômico, o sistema composto por resfriadores evaporativos é mais interessante.

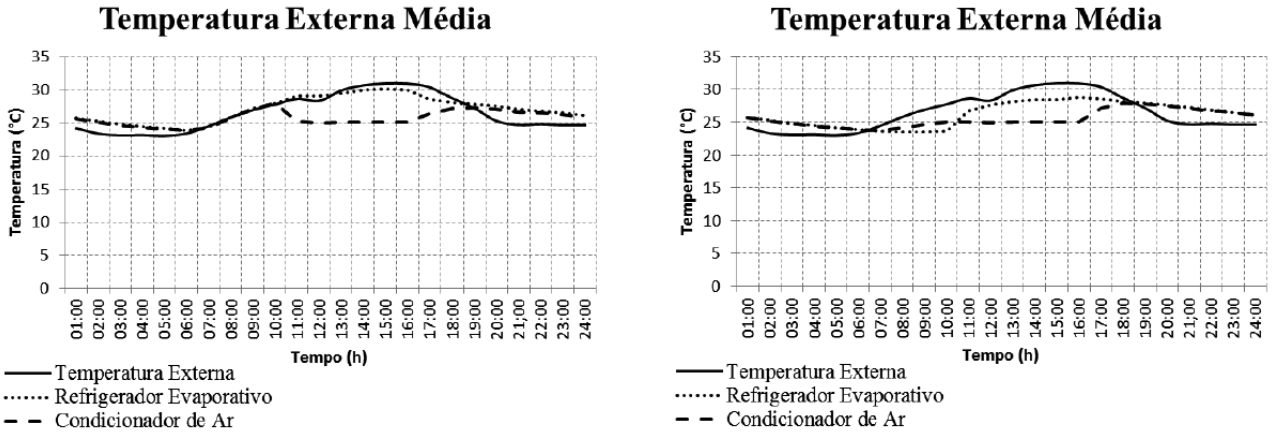
2.2.3 Comportamento Térmico da Edificação

A temperatura interna da edificação sofre alterações segundo as variações da temperatura externa, suas características físicas, materiais construtivos e sistema de climatização utilizado. Desta forma, as Figuras 5, 6 e 7 retratam o comportamento térmico da edificação para cada sistema de climatização em um dia típico, com temperaturas mais baixas, medianas e elevadas, respectivamente.



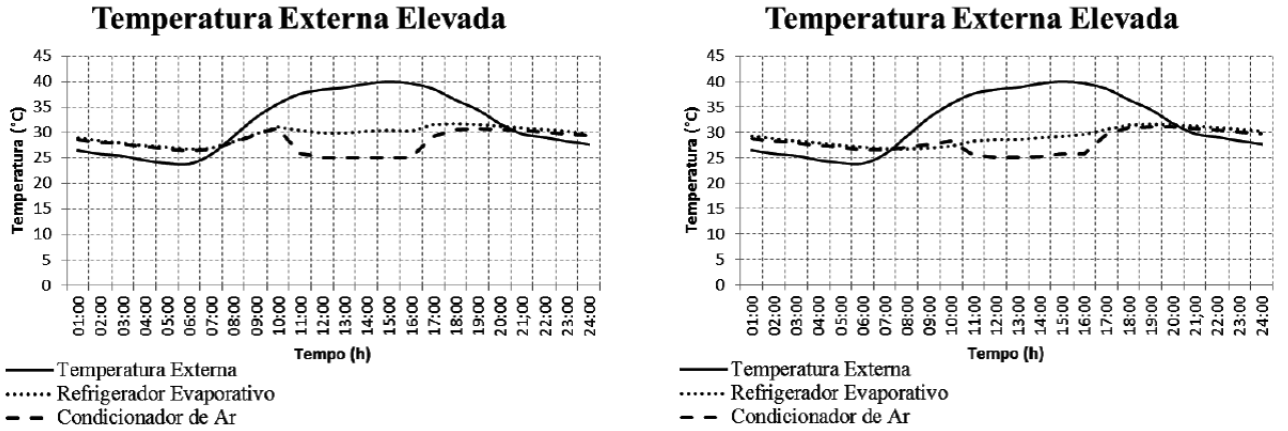
(A) Edificação antes da adequação física. (B) Edificação após adequação física.

Figura 5. Comportamento térmico da edificação para dia típico com temperaturas baixas.



(A) Edificação antes da adequação física. (B) Edificação após adequação física.

Figura 6. Comportamento térmico da edificação para dia típico com temperaturas médias.



(A) Edificação antes da adequação física. (B) Edificação após adequação física.

Figura 7. Comportamento térmico da edificação para dia típico com temperaturas elevadas.

Através da análise mais detalhada das Figuras 5, 6 e 7, verifica-se que a alteração da temperatura interna em relação à externa influencia no consumo de energia elétrica ativa e consequentemente na demanda de potência ativa solicitada pela edificação nos horários em que a mesma encontra-se em funcionamento. Embora o sistema composto por condicionadores de ar apresente um maior consumo de energia, o mesmo proporciona uma temperatura interna próxima a 25°C, mesmo para situações em que a temperatura externa é elevada, o que não ocorre com o resfriador evaporativo, que proporciona uma menor variação da

temperatura interna em relação à externa.
Analisando o comportamento térmico interno da edificação sem e com adequações físicas, percebe-se nitidamente que a temperatura interna da edificação sofreu menor alteração devido às mudanças da temperatura externa após o processo de adequação física. Isso se refletiu no menor consumo de energia elétrica da edificação para cada sistema de climatização utilizado bem como na diminuição da utilização de 1/3 das luminárias, devido ao melhor aproveitamento da iluminação natural que as janelas de vidro proporcionaram em comparação com a situação anterior, onde as aberturas das janelas eram cobertas por uma lona de PVC escura. Observa-se também que quando a climatização é realizada por resfriadores evaporativos, após a edificação sofrer as adequações físicas, o sistema conseguiu maior amenização da temperatura interna.

2.3 Análise da Qualidade da Energia elétrica

2.3.1 Conceituação e classificação das harmônicas

Sinais de tensão ou corrente com a presença de harmônicas apresentam comportamento periódico. Estes sinais possuem, além da frequência dita fundamental, frequências múltiplas inteiras desta, portanto, a forma de onda apresenta-se deformada em relação a um sinal puramente senoidal. As harmônicas podem ser classificadas quanto a sua ordem ou frequência e sequencia de fases, conforme o exemplo da Tabela 5.

Tabela 5 - Ordem ou frequência das harmônicas

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1ª	60	+
3ª	180	0
5ª	300	-
7ª	420	+

$$v_{na}(t)=V_{nam}\sin n(\omega t) \quad (2)$$

$$v_{nb}(t)=V_{nbm}\sin n(\omega t-120^{o}) \quad (3)$$

$$v_{nc}(t)=V_{ncm}\sin n(\omega t+120^{o}) \quad (4)$$

Por não ter presença característica nos sistemas elétricos, as harmônicas de ordem par não são contempladas neste trabalho. Pode-se visualizar na Tabela 5 que as harmônicas podem ser de sequência positiva (+), negativa (-) ou zero (0), o que pode ser justificado através das Equações (2), (3) e (4). Analisando tais equações, observa-se que a sequência de fase das harmônicas depende diretamente da sua ordem (n), onde n representa a ordem harmônica, vna(t), vnb(t), vnc(t) e Vnam, Vnbm, Vncm representam, respectivamente, os valores instantâneos e valores máximos das tensões fundamentais e das tensões harmônicas nas fases A, B e C.
A Tabela 6 sintetiza a terminologia aplicável às distorções harmônicas, regulamentada pela ANEEL através da Resolução 345 de 2008, que em seu módulo 8 trata dos níveis de harmônicas permitidos no sistema de distribuição elétrica nacional.

Tabela 6 – Terminologia

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT_h%
Distorção harmônica total de tensão	DTT %
Distorção harmônica individual de corrente de ordem h	DII_h%
Distorção harmônica total de corrente	DTI %
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	Hmáx
Ordem harmônica mínima	Hmin
Tensão fundamental medida	V_1

A mesma Resolução estabelece que as expressões para o cálculo das grandezas DITh% e DTT % sejam representadas pelas Equações (5) e (6). O espectro harmônico a ser considerado para fins de cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere a frequência fundamental e até no mínimo, a 25ª ordem harmônica (Hmin=25); e que os valores de referência para as distorções harmônicas totais sejam os apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de referência global das Distorções Harmônicas Totais (em porcentagem da Tensão Fundamental)

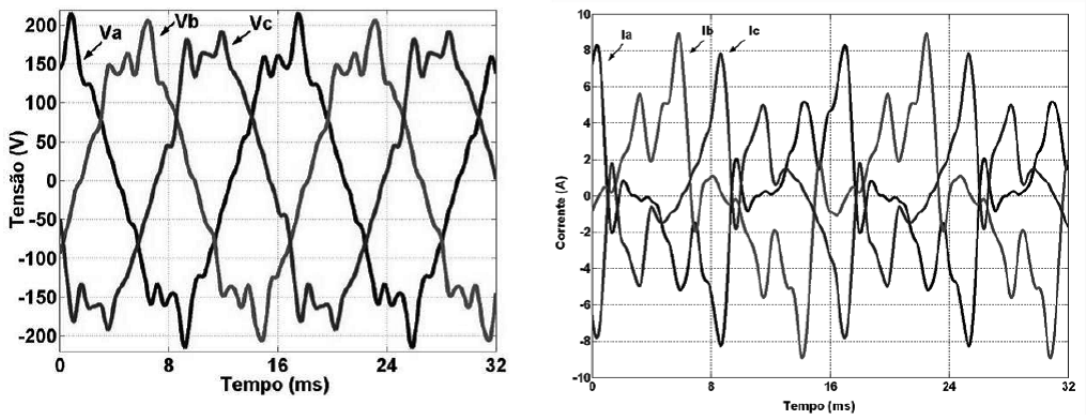
Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
Vn ≤ 1kV	10
1kV < Vn ≤ 13,8kV	8
13,8kV < Vn ≤ 69kV	6
69kV < Vn < 230kV	3

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \qquad (5)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{hmáx} V_h}}{V1} \times 100 \qquad (6)$$

2.3.2 Medições de tensões e correntes

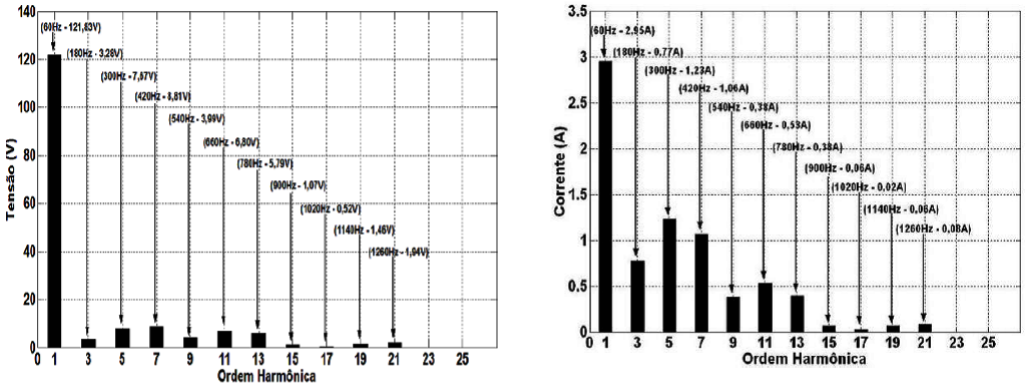
Inicialmente foram monitorados os perfis das tensões e correntes no barramento trifásico que alimenta o salão de eventos sociais, cujas formas de onda trifásicas encontram-se ilustradas nas Figuras 8.



(A) Tensão. (B) Corrente.

Figura 8. Forma de onda de Tensão e Corrente nas fases A, B e C no barramento que alimenta a edificação.

A Figura 8 permite observar, além da distorção da forma de onda das correntes, uma acentuada distorção da forma de onda das tensões. Considerando que as distorções harmônicas tanto das tensões como das correntes para as três fases são semelhantes, optou-se por mostrar as grandezas relativas à fase A. Desta forma, a Figura 9 ilustra os espectros harmônicos correspondentes à tensão e corrente da fase A, para o motor do resfriador evaporativo ser acionado na frequência de 30 Hz.



(A) Tensão. (B) Corrente.

Figura 9. Espectros harmônicos para Tensão e Corrente na fase A.

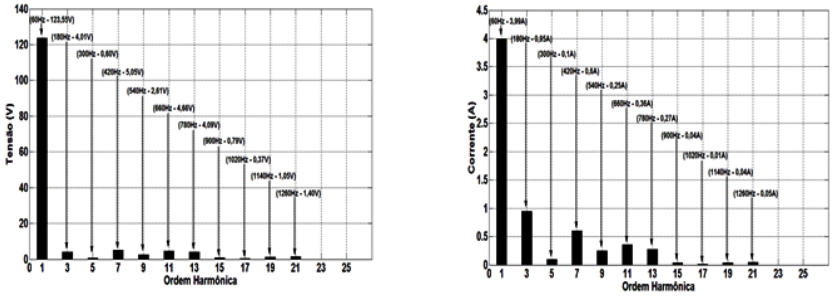
As distorções harmônicas individuais e totais de tensão e corrente estão registradas na tabela 8.

Tabela 8 Distorções harmônicas

Ordem harmonica	DII_h	DTI%	DIT_h	DTT%
1ª	2,97		121,9	
3ª	0,78		3,28	
5ª	1,24		7,74	
7ª	1,05		8,78	
9ª	0,37		3,99	
11ª	0,54	66,347%	6,88	13,016%
13ª	0,38		5,74	
15ª	0,05		0,97	
17ª	0,02		0,54	
19ª	0,06		1,49	
21ª	0,08		1,96	
23ª	0,00		0,01	

Analisando as tabelas 8, constata-se que as distorções harmônicas presentes nas correntes do sistema evaporativo acionado por conversor de frequência acarretou uma distorção total de tensão do barramento de pouco mais de 13%, valor este acima do valor de referência estabelecido através da resolução 345 de 2008 da ANEEL, que em seu módulo 8, trata dos níveis de harmônicas de tensão permitidos no sistema de distribuição elétrica nacional, conforme ilustrado na tabela 7, sendo necessária a implementação de um filtro harmônico passivo para a mitigação das harmônicas predominantes. O dimensionamento do filtro não será tratado neste trabalho.

Após a inserção do filtro, observou-se uma diminuição do conteúdo harmônico do sistema e, como se esperava, uma redução do valor das distorções harmônicas individuais de tensão e da corrente para a harmônica de 5ª ordem, conforme ilustrado pelos espectrogramas da Figura 10.



(A) Tensão. (B) Corrente.

Figura 10. Espectro de barras da Tensão e da Corrente no barramento Z após a implantação do filtro sintonizado para a 5ª Harmônica

3. Conclusões

O presente artigo apresentou a estimativa da fatura de energia elétrica referente a uma edificação utilizada para eventos sociais, usando o método convencional e usando o Software Energyplus, levando em consideração as características físicas e climáticas da região onde está localizada. Durante a elaboração da estimativa da fatura de energia elétrica, utilizando o método convencional, foi considerado que a maioria dos equipamentos instalados na edificação funciona 6 horas por dia, durante 30 dias do mês. Portanto, no método convencional, esta estimativa foi baseada na carga instalada da edificação, que é a soma das potências nominais dos equipamentos elétricos instalados na unidade consumidora em condições de entrar em funcionamento, pela análise do histórico dos consumos de energia elétrica e demanda de potência ativa, expressa em quilowatts (kW), de acordo com o artigo 115 da Resolução nº 414 da ANEEL, de 09 de setembro de 2010. No segundo método foi realizada a modelagem da edificação e seus equipamentos no programa Energyplus, que simula o consumo de energia elétrica e demanda de potência ativa da edificação em relação às estações do ano, considerando as características climáticas da região. Assim, a refrigeração do ambiente é realizada em função da temperatura interna do mesmo. Durante a realização do estudo verificou-se a grande vantagem da utilização do programa em relação ao método convencional, pois o Energyplus leva em consideração as propriedades térmicas, geométricas e elétricas dos materiais utilizados na edificação, apresentando resultados mais próximos do real obtidos através da instalação de medidores de energia elétrica. Considerando que o Energyplus é de acesso gratuito, representa uma ferramenta eficaz no cálculo

de carga térmica e na estimativa da fatura de energia elétrica.
No que tange à eficiência energética, pelas simulações e medições realizadas em campo, pode-se concluir que o sistema composto por resfriadores evaporativos apresenta um consumo de energia elétrica muito inferior ao sistema composto por condicionadores de ar. Todavia, no tocante ao conforto térmico, proporciona apenas uma pequena atenuação da temperatura interna em relação às variações da temperatura externa, em acordo com as elevadas temperaturas da região onde a edificação está localizada.
Verifica-se também que adequações físicas na edificação proporcionam um menor consumo de energia elétrica para ambos os sistemas de refrigeração analisados, a redução de 1/3 da utilização do sistema de iluminação em virtude o maior aproveitamento da iluminação natural, além de atenuar as variações de temperatura no interior da edificação.
No que se refere à qualidade da energia, o sistema de climatização por resfriador evaporativos acionado por conversor de frequência apresentou DTT% superior ao recomendado pela norma, o que foi solucionado pela implementação de um filtro sintonizado passivo para a mitigação da harmônica de 5ª ordem, mais predominante, e das harmônicas adjacentes, reduzindo a DTT% para índices aceitáveis.

4. Referências bibliográficas

1. BRASIL. Lei Nº 8.631, de 04 de março de 1993.
2. CAMARGO, J. R. Resfriamento Evaporativo – Climatização Ecológica. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009
3. BRASIL. Lei Nº 9.074, de 07 de julho de 1995.
4. MUNTERS, Manual do Produto – Ordem de Produção 7666/09. Código HCBBB0227, Munters: Curitiba, 2009.
5. ANEEL. Resolução N° 414 de 09 de setembro de 2010.
6. VASCONCELLOS, Arnulfo Barroso ; BARROS, R. S. ; BERNARDES, T. A. ; GOMES, Teresa Irene Ribeiro de Carvalho Malheiros ; B. C. Carvalho ; ANNUNCIACAO, L. . Avaliação de Resultados após Implantação de um Projeto de Eficiência Energética na UFMT. In: 3 Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2009, Belém/PA. 3 CBEE, 2009.
7. ANEEL. Resolução Nº 281, de 1º de outubro de 1999.
8. ANEEL. Resolução Normativa Nº 219, de 11 de abril de 2006.
9. ELETROBRÁS/PROCEL EDUCAÇÃO (2006). Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. Itajubá Janeiro: LTC/Eletrobrás/ EFEI.
10. ANEEL. Resolução N° 77, de 18 de agosto de 2004.
11. J. W. Resende et al, “Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários” no II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Salvador, Brasil, Nov. 2003, pp. 845- 852.
12. S. M. Silva et al, “Aplicação de Filtros Ativos e Passivos de Potência: Estudo de Caso”, na VII Conferência Internacional em Aplicações Industriais, Poços de Caldas, Brasil, Ago. 2008.
13. J. L. Afonso e J. S. Martins, “Qualidade da Energia Elétrica”, em “Revista do eletricista”, nº 9, 3º trimestre de 2004, ano 3, pp. 66-71.
14. A. B. Vasconcellos et al, “Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em um Sistema de Acionamento de Máqui¬nas Motrizes”, na IX Conferência Internacional em Aplicações Industriais, São Paulo, Brasil, Nov. 2010.
15. Resolução 345/2008 da Agencia Nacional de Energia Elétrica.
16. VASCONCELLOS, Arnulfo Barroso ; OLIVEIRA, José Carlos de ; BELCHIOR, Fernando Nunes ; OLIVEIRA, Luis Carlos Origa de ;APOLÔNIO, Roberto . Variáveis de influência na eficácia dos filtros de sequência zero. O setor elétrico, p. 46 - 52, 01 jul. 2009.
17. VASCONCELLOS, Arnulfo Barroso ; APOLÔNIO, Roberto ; NOVELO, F. ; T.V. da Silva ; BELCHIOR, Fernando N . Estudo do Impacto do Sistema de Acionamento de um Motor de Indução

Trifásico na Eficiência Energética e Qualidade da Energia Elétrica: Um Estudo de Caso Elevador de Canecas. In: IX CBQE - CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2011, Cuiabá-MT. IX CBQE - CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2011. v. 9.

18. VASCONCELLOS, Arnulfo Barroso ; B. C. Carvalho ; BRIDI, A. B. ; ANABUKI, E. T. ; NOVELO, F. . Análise da Qualidade e Eficiência de Energia Elétrica em um Sistema de Bombeamento de Água Acionado Através do Conversor de Frequência. In: IX CBQE - CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2011, Cuiabá-MT. IX CBQE - CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2011. v. 9.
19. LIMA, F. N. ; VASCONCELLOS, Arnulfo Barroso ; B. C. Carvalho ; PEREIRA, N. R. ; ZAN, J. C. . Acionamento de Condicionadores de Ar por meio de Inversores de Frequência sob a Ótica da Qualidade da Energia: Uma Avaliação Teórica e Experimental. In: IX CBQE - CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2011, Cuiabá-MT. IX CBQE - CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2011. v. 9.