

SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA DE UM SUPERMERCADO

Renato Fonseca Pedrotti – rfpedrotti@gmail.com

Paulo Otto Beyer – paulo.beyer@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, www.demec.ufrgs.br

A4 - Administração e Operação de Edifícios: Uso e Administração da Energia

Resumo.. Como ferramenta de auditoria energética em edificações, este trabalho indica uma intensidade de uso da energia de 305 kW.h/m²/ano para um supermercado existente de médio padrão, com área de piso de 5.962 m², situado em Capão da Canoa/RS. O custo médio com energia elétrica ficou estimado em 0,732 R\$/kW.h. O consumo com frio alimentar (49%) foi o protagonista, com iluminação (31%) no segundo lugar de maior consumo, seguido por AVAC (15%) e por equipamentos (5%). Resultado consistente com AERG, 2013. Para diminuir a pegada energética da edificação, foi simulada uma proposta com 47 janelas difusivas zenitais e iluminação controlada por luxímetro. As simulações indicaram um potencial de economia de 110 mil reais por ano, uma redução na intensidade do uso da energia para o patamar de 278 kW.h/m²/ano e retorno do investimento em quatro anos e meio.

Palavras-chave: Simulação termo energética, auditoria de energia, supermercado, frio alimentar.

1. INTRODUÇÃO

O ano de 2015 marcou a sociedade brasileira pela escalada da inflação, associada, em grande parte, ao repasse dos preços dos combustíveis e da energia elétrica, ora controlados pelo governo. Quanto a energia elétrica, ela aumentou, em média anual, 53%, variando nesta ordem de grandeza em função de cada concessionária. Isto, para os grandes consumidores, como hotéis e supermercados, impactou fortemente os custos operacionais. Nos supermercados este custo só passou a ser superado pela folha salarial.

Foi diante desta conjuntura, que o trabalho aqui apresentado teve a intenção de fazer uma auditoria energética por tipo de uso final em um supermercado existente. Para alcançar este objetivo foi utilizado o software EnergyPlus, como ferramenta de cálculo, e a análise da documentação de projeto, visitas técnicas e histórico das faturas de energia elétrica.

Embora a simulação termo energética tenha uma função muito mais relevante na comparação entre cenários de medidas de eficiência energética, procurou-se utilizá-la aqui, como meio de buscar representar a realidade, num contexto de auditoria energética. Modelou-se o envelope, o sistema de iluminação, o de climatização, os de frio alimentar e uma fonte ininterrupta de energia à óleo diesel. Num segundo momento sim, lançou-se mão da simulação para avaliar o impacto de uma medida híbrida de eficiência energética: o aproveitamento da iluminação natural por janelas difusivas zenitais associada com controle da iluminação artificial por luxímetro.

2. OBJETIVOS

Para vencer este trabalho foram elencados dois objetivos principais. O primeiro objetivo consistiu em modelar um supermercado existente com todos os sistemas energéticos atuando, em um horizonte anual (8.760 h) e procurar calibrá-lo para representar os tipos de uso de energia. Como segundo objetivo, prospectar uma medida passiva de eficiência energética que, além de reduzir o consumo e o custo de energia, promovesse o aumento da qualidade do ambiente interno.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Supermercados são uma tipologia ímpar de edificação comercial, pois integram sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado e refrigeração (AVAC-R), no mesmo prédio e, muitas vezes, entre si, através de estratégias e sistemas de recuperação de energia térmica. Tipicamente, também, lançam mão da utilização de grupos geradores a óleo diesel, ou gás natural, para redução do custo operacional no horário de ponta e como fonte ininterrupta, em caso de falta da concessionária. A revisão bibliográfica deste texto contempla uma série de três itens utilizados para balizá-lo, a saber: 1 Simulação de Prédio Existente; 2 Simulação Termo Energética de Supermercados; 3 Tipos de Uso Final de Energia em Supermercados.

3.1 Simulação de prédio existente

A simulação termo energética de prédio existente, com vistas ao diagnóstico e estudo de melhorias em equipamentos e sistemas, ainda é pouco documentada na academia brasileira. Carotenuto, 2009, foi um dos pioneiros na simulação termo energética destes, sendo tomado como texto de referência essencial, em língua portuguesa, para a evolução deste trabalho. Ele estudou o consumo de energia do prédio do Instituto de Química Industrial, em um momento de valorização do patrimônio histórico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Em comum com este trabalho convergem o nível de detalhamento das variáveis de entrada. As zonas térmicas foram definidas por tipo de uso e por tipo de sistema de climatização, enquanto os padrões de uso foram definidos por entrevista com o operador da edificação. Quando a informação do operador não foi suficiente, buscaram-se premissas em normas internacionais e, em último caso, a estimativa empírica, assim como em projetos comerciais.

3.2 Simulação termo energética de supermercados

Também, com relação à tipologia de edificação, supermercados, há uma escassez de produção científica, na linha das simulações de energia anual. A maioria esmagadora das publicações versa sobre escritórios, certificação/etiquetagem de edificações e estudos paramétricos em prédios fictícios. Pode-se atribuir este fato a recente difusão deste tipo de simulação como ferramenta de diagnóstico para estudos de retro comissionamento, associado ao alto nível de especificação técnica dos equipamentos, requerido pelos sistemas modelados. Ao estudar índices de consumo de energia em supermercados,

Branco, 2010, observou a influência do clima brasileiro em uma tipologia específica de supermercado, de volumetria genérica e, simultaneamente, cumprindo os requisitos de ASHRAE, 2004. Em ambos os trabalhos está incluído o módulo de frio alimentar do EnergyPlus. Em comum com essa referência, neste trabalho, há a declaração dos sistemas de auto-serviço (aqueles onde a unidade condensadora e compressora está acoplada ao balcão resfriado, impondo carga térmica à zona que lhe abriga). A mais, há a declaração de uma central térmica de produção de frio alimentar com fluido secundário, de acordo com os equipamentos instalados na edificação.

3.3 Tipos de uso final da energia em supermercados

Neste tipo de simulação é possível filtrar a visualização do consumo e demanda de energia por tipo de uso final. Parte da intenção deste trabalho é comparar os resultados da simulação contra os dados da Tab. 1. Neste texto, refrigeração e frio alimentar se referem ao mesmo uso final, enquanto climatização, aglutina o uso de energia com resfriamento, aquecimento e ventilação.

*Tabela 1 Relação dos percentuais de consumo por tipo de uso final de energia, segundo as referências consultadas. * Para Porto Alegre/RS*

Tipos de Uso Final, %	Panesi, 2008	Branco, 2010*	AERG, 2013
Refrigeração	25	24	60
Iluminação	20	16	18
Climatização	30	40	15
Outros	25	20	7

Pode-se verificar que as referências mais antigas reportam climatização como o maior uso final de energia, enquanto a mais recente sinaliza frio alimentar como o maior consumo. Ao passo que iluminação fica em torno de 18%, nas três referências.

4. METODOLOGIA E DESCRIÇÃO DAS CARGAS E SISTEMAS

Uma metodologia interessante, e muito difundida internacionalmente, para o diagnóstico e estudo de medidas de eficiência energética em edificações, passa pela aplicação da abordagem clássica de simulação de energia, “forward modeling”. Nesta metodologia, todas as variáveis controláveis (schedules, cargas térmicas internas, configurações de termostato) e as incontroleáveis (clima, através do arquivo climático) são, minuciosamente, descritas, bem como a respectiva estrutura dos sistemas (as propriedades termo físicas dos materiais, a geometria da edificação modelada, os dados de desempenho dos equipamentos e etc.) são alimentados em software para que a solução das equações de balanço de energia gerem respostas, variáveis dependentes das de entrada (Beck and Arnold, 1977; Rabl, 1988 apud ASHRAE, 2013a).

4.1 Geometria e zonas térmicas

O supermercado foi modelado em 27 zonas, com uma área de piso total de 5.962 m². A sua fachada principal, a de entrada para o público, é sul sudeste e a sua área envidraçada externa é da ordem de 2,5% da área de piso. O pé direito na cumeeira é de 8,5 m de altura, enquanto na viga de suporte do telhado são 7 m. Para as zonas de pé direito simples, considerou-se 3,5 m. Essas dimensões foram levantadas em cortes e detalhes da documentação de projeto e verificados com medição no local. Segue uma ilustração do modelo tridimensional na Fig 1.

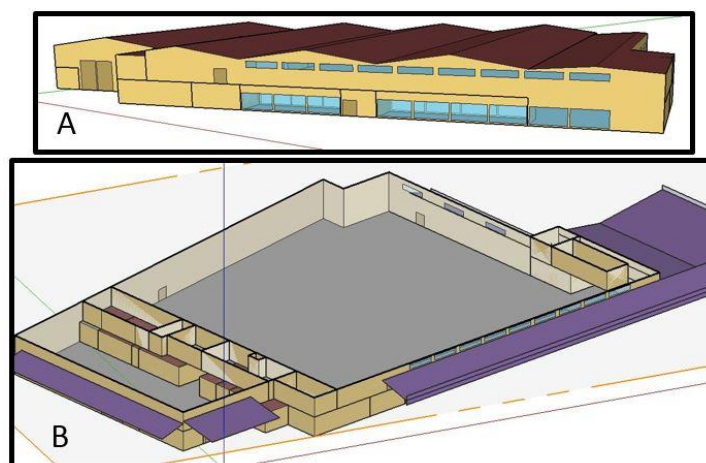


Figura 1 Volumetria da edificação simulada

No detalhe A da Fig. 1 segue uma vista da direção sudeste, mostrando a fachada principal e cobertura, sem os dispositivos de sombreamento. Já no detalhe B uma vista de sudoeste superior, com o telhado omitido para que se perceba o zoneamento e a volumetria do modelo.

Os materiais do envoltório foram verificados junto a documentação de projeto e as suas propriedades termo físicas levantadas de ASHRAE, 2013b, para o cálculo da transmitância térmica, U , $W/m^2.K$). Com relação aos padrões construtivos, foram identificados e implementados tipos de parede externa ($U = 2,721 W/m^2.K$), interna leve ($U = 1,862 W/m^2.K$) e isolada ($U = 0,309 W/m^2.K$), cobertura ($U = 0,37 W/m^2.K$), piso ($U = 1,465 W/m^2.K$) e entrepiso ($U = 1,53 W/m^2.K$). A parede isolada remete as paredes das áreas refrigeradas e o entrepiso representa a interface entre uma zona térreo e a adjacente acima, mezaninos. A refletância das superfícies considerada foi de 50%, observando-se o estado bem conservado e de cor clara semibrilho em que se encontra pintada a edificação.

4.2 Arquivo climático e o ambiente virtual

Neste trabalho o ambiente virtual foi alimentado com o arquivo climático da estação meteorológica de Tramandaí/RS, por ser a mais próxima da edificação, que está construída em Capão da Canos/RS. Ele utiliza dados coletados de 2001 a 2010 e foram tratados com a metodologia “Typical Meteorological Year”, TMY. Para informações detalhadas a respeito desta métrica e de como se deu esse processo, de disponibilizar dados climáticos no Brasil, consultar Roriz, 2012.

As simulações foram configuradas para um *timestep* de 15 minutos. Para passos de tempo sub horários, os dados climáticos são interpolados pelo EnergyPlus, proporcionando uma melhor resolução na evolução da demanda de energia da edificação.

4.3 Cargas térmicas internas

As cargas térmicas internas podem ser sensíveis ou latentes. A carga térmica de calor sensível é aquela imposta, diretamente, por diferença de temperatura, à zona térmica. Já a carga térmica de calor latente é o aumento do conteúdo de umidade da zona térmica.

4.4 Pessoas e ocupação

A contribuição das pessoas na carga térmica de uma edificação se dá em função do tipo de atividade que estas pessoas estão desenvolvendo, em cada zona térmica. Elas foram levantadas da NBR 16.401, 2008. Nesta mesma norma, estão disponíveis as taxas de ocupação média, em função do uso da edificação. O supermercado deste modelo foi assumido como de padrão médio.

Para as pessoas em atividade de escritório, desenvolvendo trabalho leve, foram alimentadas cargas de 140 W por pessoa (com parcela sensível de 75 e latente de 55 watts por pessoa). O agendamento, *schedule*, das pessoas em atividade de escritório foi de segunda a sábado, das 08 h às 19 h. Considerou-se carga nominal neste período, exceção do intervalo de almoço, das 12 h às 14 h, onde foi considerada 50%.

No salão de vendas, como premissa, foi assumida uma densidade de ocupação de 10,2 m^2 por pessoa, totalizando 396 pessoas, simultaneamente, nesta zona. Assumiu-se que o público estava desenvolvendo trabalho moderado, do tipo “caminhando, em pé parado”, contribuindo com 160 W por pessoa (83 watts de sensível e 77 de latente). Esta atividade foi estendida para as pessoas que ocupavam as zonas de preparo, padaria e açougue. A fração sensível radiante foi de 30%. O *schedule* de ocupação do salão de vendas foi estabelecido como o horário de funcionamento público da loja: de segunda-feira a sábado, das 7:30 às 23 h e nos domingos, das 8 às 21 h, em carga nominal. A atividade na retaguarda começa e termina com defasagem de 30 minutos do expediente público. Nos feriados nacionais, por premissa, não houve expediente, nem externo e nem interno, somente os sistemas de frio alimentar operaram.

4.5 Iluminação

Os agendamentos de iluminação acompanham os de ocupação, em carga nominal. A potência de iluminação instalada em cada zona térmica foi levantada do projeto elétrico. Em resumo, são 73,5 kW no salão de vendas e 17,3 kW na retaguarda. Esta loja ainda apresenta 4 setores de iluminação externa: pátio de descarga (5.184 W), fachada da loja (4.968 W), estacionamento (5.832 W) e postes (10,4 kW). Os setores do pátio de descarga e do estacionamento operam das 19 às 23 h, enquanto a iluminação da fachada e os postes permanecem acionadas ao longo de toda a madrugada, até às 6 h da manhã.

4.6 Equipamentos

Nesta simulação foram adicionados os computadores e os equipamentos de preparo da padaria e grill. A carga de equipamentos de informática foi assumida como 115 W por estação de trabalho. Embora as estações de trabalho do salão de vendas e dos escritórios da retaguarda sejam diferentes, foram assumidas iguais. Com relação aos agendamentos, elas acompanham as respectivas ocupações do salão de vendas e escritórios. Este tipo de equipamento não tem contribuição latente e a sensível apresenta uma fração de 35% pelo mecanismo radiante.

Inspecionada a planta de leiaute, foram incluídos no modelo termo energético deste trabalho a carga energética imposta por fritadeiras e fornos elétricos de panificação. Os equipamentos do açougue e preparos foram negligenciados tendo em vista a baixa potência (até 1.500 W), associado a um alto fator de diversidade (ciclos de uso não periódicos). Todos os pontos de cocção da retaguarda do supermercado contam com sistema de coifa para exaustão de vapores graxos, dessa forma, não há contribuição latente destes equipamentos para o balanço da zona térmica. Os agendamentos acompanharam a atividade da retaguarda.

Foram adicionadas duas fritadeiras duplas, uma na padaria e outra no grill, conforme leiaute. Cada uma com 4.000 W de capacidade, fração radiante de 35% e fator de uso de 6%, seguindo orientação de ASHRAE, 2013c. Isto significa que o equipamento demandará o fator de uso, aplicado sobre sua carga nominal, do sistema de energia da edificação, a cada passo de tempo da simulação. Os outros equipamentos de cozinha adicionados a simulação foram três fornos de panificação de 14,75 kW, cada um, com fator de uso de 16%.

4.7 Sistema de climatização

Neste supermercado estão instalados sistemas de climatização no salão de vendas e nas zonas de escritórios da retaguarda. No salão de vendas está montado um sistema dutado com seis unidades independentes de expansão direta e compressor com rotação variável, “splitões inverter”. Nos escritórios estão instalados equipamentos “mini split” de compressor com rotação constante. A simulação progrediu com os sistemas auto dimensionados.

A climatização está disponível no mesmo agendamento que o expediente interno da loja, acionada 30 minutos antes da abertura ao público, às 7 h da manhã, quando os fiscais abrem a edificação ao acesso dos colaboradores. Os termostatos ficam configurados para 23° C no modo resfriamento e 20° C no modo aquecimento em todas as aplicações de conforto. Todos os ambientes climatizados da simulação contam com renovação de ar, conforme ANVISA, 2003.

Com relação ao sistema simulado para atender o salão de vendas, foi utilizado um modelo unitário de quatro velocidades, onde o coeficiente de performance, COP, foi ponderado em função do número de unidades, para as quatro velocidades de operação (100%, COP = 3,11; 75%, 3,29; 50%, 2,96; 25%, 2,81), de acordo com o apresentado em Hitachi, 2014. Os sistemas “mini Split” tiveram o COP configurado em 3,2 kW/kW, etiqueta PROCEL nível A, seguindo orientação do projeto básico. Não foi possível conferir as placas in loco.

4.8 Sistemas de frio alimentar

Podem-se elencar duas estratégias principais para a implementação de frio alimentar em supermercados. Na mais comum, utilizam-se módulos independentes, de autosserviço na produção do frio, enquanto na mais complexa, projeta-se uma central térmica para a produção e distribuição centralizada do frio alimentar, a partir de uma casa de máquinas. No supermercado deste estudo a estratégia é mista: a parte de congelados está em autosserviço, enquanto a de resfriados é atendida por central térmica.

Este trabalho está limitado a representar o que há instalado, para se ter uma estimativa razoável da evolução do seu consumo, da sua demanda ao sistema de energia e do peso no consumo anual por uso final. Segue na Tab. 2 a relação das capacidades de produção de frio alimentar declaradas.

Onde Top é a temperatura de conservação do balcão/câmara/ilha e a coluna “sistema” se refere ao tipo de sistema produtor de frio: se autosserviço (AS) ou central térmica (CT). Tais dados foram levantados do projeto de frio alimentar, disponibilizado pela Eletrofrio de Curitiba/PR.

Os sistemas de autosserviço de produção de frio se caracterizam por acoplar, junto ao espaço refrigerado, o sistema de produção de frio. Desta forma, o calor de condensação do ciclo de refrigeração se traduz, diretamente, em carga térmica à zona que lhe abriga. Por outro lado, a montagem industrializada destes gabinetes garante o desempenho e prolonga a vida útil dos sistemas, a custos mínimos de manutenção e operação.

Tabela 2. Relação das capacidades de frio alimentar instaladas na loja

Salão de vendas				Retaguarda			
Tipo	Capacidade, kW	Top, °C	Sistema	Tipo	Capacidade, kW	Top, °C	Sistema
Ilhas resfriados	11,66	2	AS	Câmara Açougue	19,5	-22	AS
Ilhas congelados	74,56	-22	AS	Câmara Padaria	5,26	-22	AS
Balcões de resfriados	66,15	2	CT	Preparos	66,82	10	CT
Geladeiras de bebidas	16,7	2	CT	-	-	-	-
Total	169,07	-	-	Total	91,58	-	-

Observando-se a Tab. 2 deve-se perceber que a carga térmica de congelados está totalmente atendida por AS. Os dados de COP e de desempenho em função da temperatura destes sistemas foram levantados em NREL, 2011. Foram tomados 2,5 kW/kW para aplicações de média temperatura, resfriados, e 1,3 kW/kW para as de baixa temperatura, congelados. O sistema de degelo destes equipamentos está configurado para ciclo desligado, uma vez por dia, de 30 minutos, às 4 h da madrugada.

Enquanto na escala dos grandes varejistas de alimentos, é interessante construir e operar uma casa de máquinas que diminua e restrinja a presença de fluido refrigerante ao seu espaço, transportando energia térmica através de um fluido intermediário, em um circuito secundário. Assim, se produz água gelada com solução anti congelante para alimentação de forçadores de câmaras frias e balcões resfriados do salão de vendas, por exemplo. Os dados a seguir foram retirados do projeto da central térmica.

A carga térmica de refrigeração é transferida para a central térmica através de um circuito de água gelada em solução com 30% de propileno glicol, através de um trocador de placas intermediário, conhecido como evaporador secundário. Este circuito, o secundário, que atende as cargas térmicas, possui duas bombas de 2 L/s e 1 kW, cada, em paralelo, para impor uma vazão volumétrica de, até, 4 L/s. O trocador de placas, do tipo evaporador, apresenta 7,5 K de diferença de temperatura entre o lado frio (evaporando) e a saída do lado quente (solução gelada), permitindo uma redução de 11,4 K na temperatura da solução.

A central térmica de frio alimentar está projetada para evaporar o fluido refrigerante, R-134a, a -10 °C e condensá-lo a 45 °C (o projeto considerou 35° C de temperatura do ar externo). Estão instaladas quatro unidades, em paralelo, do modelo de compressor semi hermético 6GE30Y, da Bitzer, sendo duas de reserva. Cada compressor produz, segundo o software do fabricante, uma capacidade de 48.376 W de frio, impondo 19,29 kW de demanda elétrica, conforme condições da EN 12.900, 2013.

A parte de condensação do ciclo de refrigeração consiste em duas unidades remotas HeatCraft, modelo ACV23808E51380A, com capacidade instalada de 183.667 W, para 10 K de diferença de temperatura entre a de condensação e a do ar externo na entrada da unidade. Cada unidade conta com cinco ventiladores instalados, impondo 3,5 kW de demanda elétrica total.

5. TARIFAS DE ENERGIA

O supermercado deste estudo está conectado na média tensão, em 13,8 kV de tensão de linha, com a concessionária CEEE. A loja está comprando energia no subgrupo A4, na modalidade verde. Neste plano, o consumidor paga pelo pico de demanda mensal e a energia é tarifada em dois postos, ponta, P, e fora da ponta, FP. Como medida de redução de custos, a edificação dispõe de um grupo gerador a óleo diesel para o horário de ponta.

Para discussões financeiras foram tomadas as tarifas e impostos da fatura de agosto/2015, a última acessada pelo autor. O quilowatt de demanda custa R\$ 12,71, o quilowatt hora na ponta R\$ 1,379665 e o fora da ponta R\$ 0,424655. O adicional da bandeira tarifária consistiu em R\$ 0,045 por quilowatt hora e os tributos, tomados “por dentro”, com alíquotas de 25% de ICMS e 3,17% de PIS/COFINS.

5.2 Grupo gerador no horário de ponta

Na modalidade de tarifa horo sazonal pode ser, financeiramente, interessante manter um grupo gerador atendendo a demanda no horário de ponta, que é o período entre às 18 e às 21 h, dos dias úteis. Modo de operação também conhecido por “prime”. Na edificação estudada está instalado um grupo gerador Cummins, modelo C450D6.

Neste modo ele é capaz de atender 410 kW de demanda elétrica. Para a análise financeira foi tomado o valor de R\$ 12 mil por mês com a locação do equipamento e um custo de R\$ 4,00 por litro de óleo diesel, posto na loja, conforme Góes, 2015.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As páginas da seção Metodologia buscam posicionar o leitor com relação aos modelos e ao volume de informações e especificações técnicas requisitadas/disponíveis para que se simule/estime o consumo de energia em uma edificação

existente, ou não. O primeiro passo numa análise dos resultados da simulação, consiste em verificar se o modelo termo energético representa, com razoável precisão de engenharia, a realidade na qual está inserido.

Depois de qualificado o modelo, passa-se a assumir o seu comportamento e, conseqüentemente, o seu consumo/custo com energéticos, como parâmetros de referência para comparação do desempenho de medidas de eficiência energética, os chamados cenários.

6.2 Visão mensal do consumo e demanda de energia

Concluída a entrada de dados do modelo de referência, procederam-se às simulações. Nesta primeira aproximação, buscou-se comparar o consumo de energia mensal (MW.h/mês) e o pico mensal de demanda (kW pico) entre os dados faturados e os resultados simulados. Na Tab.3 resumem-se os consumos faturados e demandas de pico das contas de energia, e foram adicionadas as respectivas informações geradas pela simulação do modelo de referência.

Nos meses sinalizados com “ND”, os dados não estavam disponíveis. A diferença absoluta é subtrair o dado faturado do resultado da simulação. A relativa é a diferença absoluta sobre o dado faturado.

Tabela 3 Relação dos dados faturados e simulados com as respectivas diferenças absolutas e relativas

Meses do ano	Energia, MW.h				Demanda, kW			
	Faturado	Simulado	Diferença absoluta	Diferença relativa	Faturado	Simulado	Diferença absoluta	Diferença relativa
Jan	192	155	-38,4	-19%	372	406	33,9	9%
Fev	181	146	-35,0	-19%	378	420	41,6	11%
Mar	191	158	-33,0	-17%	387	393	5,5	1%
Abr	153	134	-20,5	-13%	381	336	-45,5	-12%
Mai	127	128	0,7	1%	315	336	21,4	7%
Jun	126	116	-10,8	-8%	289	265	-23,8	-8%
Jul	105	123	18,0	17%	269	284	15,0	6%
Ago	122	123	0,8	1%	246	271	25,1	10%
Set	ND	119	-	--	ND	280	-	-
Out	ND	132	-	--	ND	316	-	-
Nov	ND	133	-	--	ND	323	-	-
Dez	202	146	-56,6	-28%	369	363	-5,6	-2%
	Soma	1.613			Máxima	420	Média	333

Para os três primeiros meses verifica-se um consumo de energia da simulação, na ordem de 20% menor que o faturado, contrastando com uma demanda de pico 10% maior, também apresentada pela simulação. O pico de demanda maior pode-se justificar na estratégia de manter as cargas internas em regime “sempre ligado, quando ocupado”, em nível nominal. O intuito desta estratégia é impor um patamar máximo de demanda na simulação, permitindo que as variações da edificação real estejam internas a esta evolução. Como será verificado na figura da próxima seção. Na contramão de demandas maiores, o consumo de energia ter evoluído abaixo do faturado indica discrepâncias de schedules, agendamentos. Esta diferença é tolerável, tendo em vista as variações climáticas e da sazonalidade na ocupação da edificação.

Para os meses de abril a agosto tanto a demanda quanto o consumo simulado apresentaram uma evolução entrelaçada com a medida pela concessionária de energia elétrica. A exceção está no mês de julho, onde o faturamento do consumo destoa, inclusive, dos meses adjacentes (junho e agosto), em 20%. O volume maior de energia consumida pela simulação neste período pode ser atribuído a demanda de climatização no inverno, que, na medida do possível, não é utilizada pelo operador, dada a redução de movimento no litoral e o clima mais ameno, temperatura de bulbo seco, média aritmética, em torno dos 16°C ao longo do inverno do arquivo climático.

Há, também, uma janela de faturamento, de setembro a novembro, desconhecida do autor, que teve acesso aos dados da concessionária, apenas, até agosto/2015. Com relação a dezembro, que, como dito, é de 2014, foi verificado que ainda não havia sido instalado o grupo gerador para o horário de ponta, que entrou em marcha a partir de fevereiro. Nestes dois meses, dezembro/14 e janeiro/15, houve um consumo médio de 10 MW.h a mais, os quais, na simulação, foram atendidos pelo grupo gerador.

O total de energia consumida da concessionária ficou simulado em 1,613 GW.h, correspondendo a 88,5% do consumo anual da edificação. O custo com energia elétrica da rede pública é da ordem de 1,126 milhões de reais por ano, dos quais 61% correspondem a energia fora da ponta, 6% ao adicional da bandeira tarifária, 5% fruto da demanda e 28% são impostos. Relacionando o custo anual com eletricidade da rede pública sobre a área construída, alcança-se 189,03 R\$/m²/ano, enquanto que relacionar o custo total desta energia com o respectivo volume, tem-se um preço unitário de 0,6187 R\$/kW.h da rede pública.

6.3 Visão diária, em quartos de hora, da evolução da demanda no supermercado

Para uma segunda análise, mais refinada, em passos de tempo de 15 minutos, a respeito da qualidade do modelo de referência em representar a realidade, o operador disponibilizou a medição da demanda de energia elétrica entre o período de 11 de agosto a 09 de setembro de 2015. Com estes dados foi possível comparar uma evolução da simulação diretamente contra uma medição de demanda, na mesma base de tempo, virtual e real.

Na Fig.2 segue a janela das 24 horas do dia 15 de agosto, um sábado, demonstrando as evoluções das demandas, medida pela concessionária e a simulada, de energia elétrica da edificação.

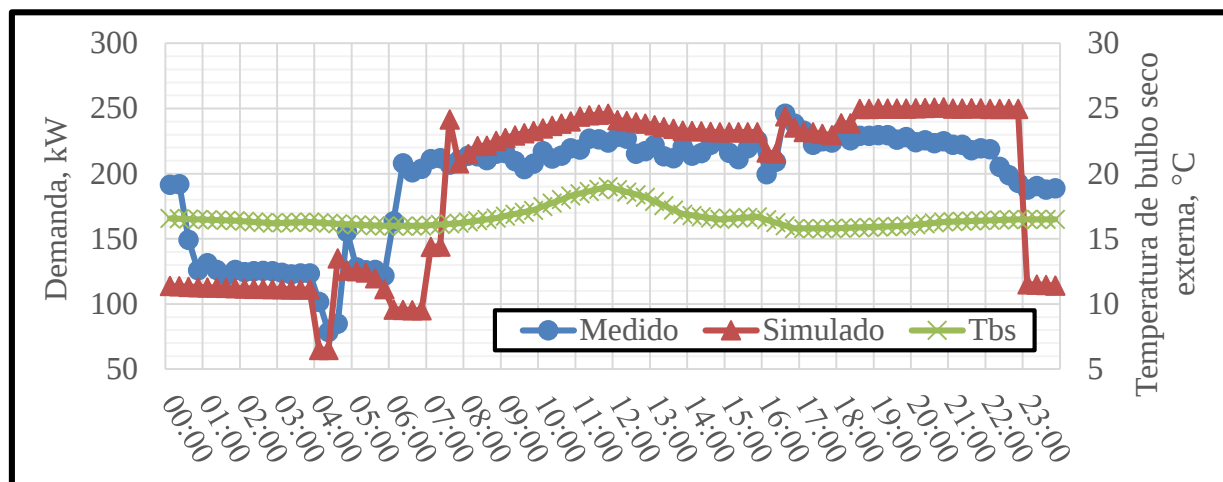


Figura 2 Demonstração das demandas medidas e simuladas para o dia 15 de agosto

Como descrito na metodologia, durante as madrugadas as luminárias externas ficam parcialmente acionadas, junto com a produção de frio alimentar, sincronizando os períodos de degelo às 4 h da manhã e às 16 h.

Às 6 h da manhã, na saída da iluminação externa da simulação, pode-se perceber uma defasagem entre a demanda da edificação real e a simulada, em torno de duas horas. Este comportamento está associado a acionamentos na retaguarda (principalmente padaria) e no salão de vendas da edificação real, e a climatização (ao redor das 7 h) e ocupação do salão de vendas (a partir das 7:30), no modelo termo energético.

Até às 16 h pode-se inferir um aumento na demanda, em função do aquecimento do ambiente externo, onde ambos respondem conforme a evolução da temperatura de bulbo seco externa do arquivo climático, no eixo secundário da figura. No começo da noite, 18:30, pode-se verificar o acionamento da iluminação externa, pela simulação, bem como a gradual diminuição da demanda medida, ao longo da noite. Este fato pode ser justificado pela diminuição da atividade na retaguarda da edificação, até o fechamento dos expedientes.

O desligamento da climatização às 23 h, junto com parte da iluminação externa e todas as cargas internas, pode ser considerado brusco na simulação, porém pode se mostrar dispendioso, em termos de ganho na acurácia dos resultados, modelar tais variações horárias de acionamento.

6.4 Visão da operação do grupo gerador

A produção total de energia elétrica a óleo diesel simulada foi de 208 MW.h (11,5% da energia elétrica consumida), a um custo anual de R\$ 207 mil. Perfazendo uma relação de 0,996 R\$/kW.h, ou de 34,81 R\$/m²/ano. A simulação também indica um consumo de 57,5 mil litros de combustível por ano, indicando uma relação de 3,622 kW.h por litro de óleo diesel.

6.5 Análise energética anual do supermercado

Diante do apresentado, pode-se qualificar o modelo termo energético ao que se propõe. Na comparação direta, este resultado se aproximou da referência mais recente, AERG, 2013. Os resultados globais do modelo de referência simulado estão na Fig. 3. Neste gráfico, as siglas do anel interno são as categorias de uso de energia: RFG – refrigeração, frio alimentar; LGT – iluminação; AVAC – aquecimento, ventilação e ar condicionado; EQP – equipamentos. No anel externo estão os consumos de energia elétrica, em MW.h, para as respectivas subcategorias.

Analisando-se dos maiores para os menores usos finais, pode-se verificar a dominância do consumo com frio alimentar, onde os sistemas de autosserviço gastam, aproximadamente, 140 MW.h a mais que a central térmica, para uma capacidade instalada 35% menor. Este resultado pode ser inferido ao coeficiente de performance associado a cada nível de temperatura: quanto menor a temperatura de evaporação, maior a taxa de consumo de energia pelo ciclo de refrigeração. Enquanto a central térmica, que opera no nível de resfriados, apresentou um COP médio anual de 4,929 kW/kW, os sistemas de autosserviço, demonstraram COP médio anual de 1,514 kW/kW, no nível de congelados.

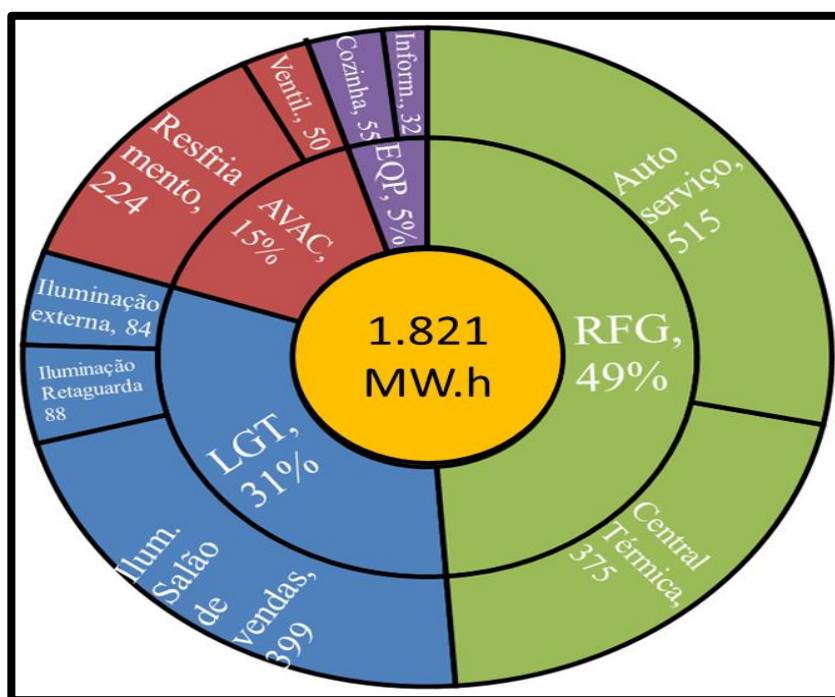


Figura 3 Relação do consumo de energia por categoria, em porcentagem, e das subcategorias, em MW.h, simulados

Iluminação é o segundo maior uso final, enquanto as referências indicam-no como terceiro maior consumo. Na próxima seção será abordada uma ação híbrida para a redução do seu consumo. Será avaliado o impacto de janelas zenitais, medida passiva, associada a automação de iluminação controlada por luxímetro, medida ativa, no salão de vendas e no depósito.

Com relação ao sistema de climatização, tem de se louvar a solução implementada no salão de vendas. O sistema dutado garante versatilidade e redundância, através dos acionamentos independentes, a um baixo custo energético, em função da rotação variável dos seus compressores. Por fim, no que diz respeito ao consumo de equipamentos, percebe-se que o consumo associado a produção de alimentos na loja é apreciável, frente ao com informática.

O consumo anual de energia elétrica no supermercado ficou simulado em 1,821 GW.h, enquanto o custo total estimado em 1,334 milhões de reais por ano. Na relação do consumo anual com a área de piso, chega-se a uma intensidade de uso da energia, EUI, na sigla em inglês, de 305 kW.h/m²/ano, na relação do custo anual pela área de piso o valor é de 223,85 R\$/m²/ano e na relação do custo total com energia sobre a energia elétrica total consumida, a relação indica 0,732 R\$/kW.h.

6.6 Iluminação natural e automação para redução dos custos com energia

Vencida a primeira etapa do trabalho, qualificando o modelo termo energético em representar a edificação real, neste segundo momento, avaliou-se o impacto no consumo/custos com energia elétrica de uma medida híbrida de eficiência energética. Esta consiste na implementação de janelas zenitais no salão de vendas e no depósito, associada a automação da potência de iluminação, controlada por luxímetro.

Foi configurado 1.000 lux como “set point” dos luxímetros de controle. Dessa forma, a partir de 1.000 lux a fração controlada da iluminação interna não é acionada, enquanto que abaixo do “set point” ela é linearmente acionada. Foi estabelecido um limite mínimo de 20% da potência de iluminação acionada. A altura dos sensores configurada foi de 5,5 m do piso. O salão de vendas foi dividido em duas alas, a leste e a oeste. Por sua vez o depósito em alas norte e sul, conforme ilustrado na Fig. 4. Cada ala tem um luxímetro independente, responsável por metade da potência de iluminação disponível. O topo do telhado, as cumeeiras, foram omitidas dessa representação para que se observe a posição dos sensores. As posições estão indicadas pelas setas.

As 47 janelas modeladas na cobertura, 10 na do depósito e 37 na do salão de vendas, são compostas por duas lentes acrílicas, com 3 mm de espessura, cada, e uma câmara de ar intermediária de 40 mm de espessura, com dimensão do vão luz em 1,6 m de largura e 3,1 m de altura. A janela foi referenciada no modelo 800 MD da fabricante Sunoptics. Segundo Sunoptics, 2013, para esta geometria de janela o fator de ganho de calor solar, SHGC, na sigla em inglês, é de 42%, a transmitância térmica da janela, U, é de 0,74 W/m².K e a fração transmitida da luz, no espectro visível, τ_{vis} , é de 68%.

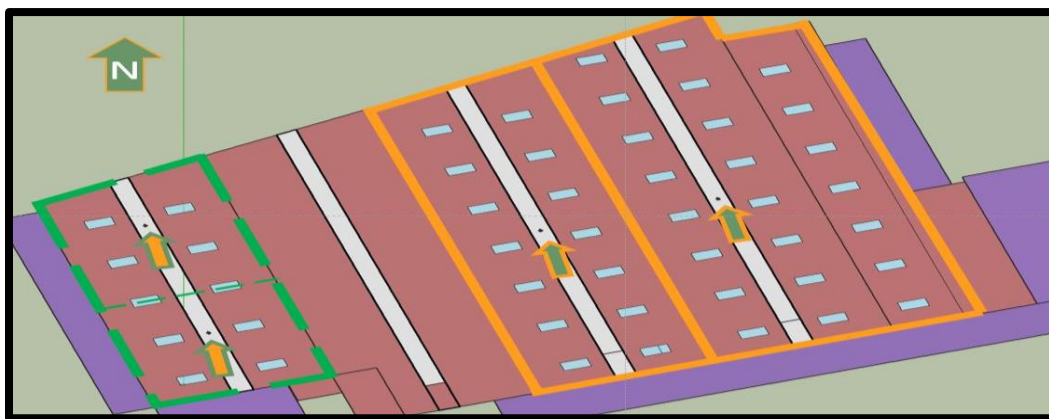


Figura 4 Vista superior do modelo termo energético com janelas zenitais e indicação dos luxímetros

Esta medida híbrida é tão poderosa, que o consumo anual de energia elétrica do modelo de referência, 1,821 GW.h por ano, foi reduzido em 8,78%. Foram salvos 161 MW.h, diminuindo o consumo total para 1,661 GW.h por ano.

O grande impacto deve-se a redução, direta, no consumo com iluminação. Foram salvos 142 MW.h pelo uso de iluminação natural e automação, mas, também, através de compensação indireta com a climatização. O consumo da categoria AVAC foi reduzido em 8,3%, aproximadamente, 19 MW.h. O montante economizado é da ordem de 110 mil reais por ano.

Segue na Fig.5 a comparação dos consumos de energia por uso final entre os modelos de referência e este, melhorado. A luz desse gráfico busca demonstrar não só a composição de onde ocorreu o ganho direto de eficiência, através da redução do consumo, mas, principalmente, a compensação indireta desta medida híbrida na composição do consumo de climatização. Além da apreciável redução de consumo do modo de resfriamento, pode-se verificar o aumento, sensível, no consumo de aquecimento.

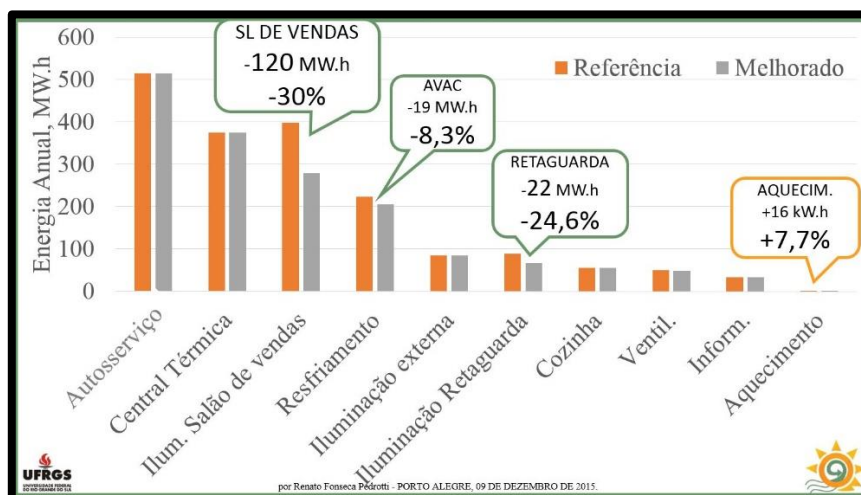


Figura 5 Comparação entre o volume de energia simulado no modelo de referência e no modelo melhorado, para cada subcategoria de uso final

Para uma análise financeira, segundo Fischer, 2015, pode-se começar um estudo de custos a um preço de 1.370 R\$/m² desse tipo de janela zenital. Assim, para os 233 m² de cobertura que foram substituídos por janelas difusivas, estima-se um custo com material e instalação, da ordem de 320 mil reais. Já para o sistema de automação de iluminação proposto, segundo AlDent, 2015, é possível projetar e executar o sistema simulado com um investimento de 55 mil reais.

Tendo em vista o caráter de obra em edificação existente, pode-se adicionar, ainda, 25% ao custo total, como despesas de contingenciamento, totalizando um montante da ordem de 469 mil reais em investimentos. Os quais poderiam retornar em, aproximadamente, quatro anos e quatro meses, demonstrando a atratividade desta medida de eficiência energética. Estes custos poderiam ser menores na época da construção da edificação, tendo em vista a complexidade da montagem.

7. CONCLUSÕES

Vencidos os objetivos propostos para este trabalho, a mensagem a se passar é a de que a eficiência energética e a conservação de energia deveriam receber a mesma atenção, senão mais, que a produção e comercialização da energia, pois trata-se do uso racional do recurso disponível. Na linha de prospectar e avaliar oportunidades de conservação de

energia, este trabalho utilizou a capacidade do EnergyPlus alimentar análises qualitativas superiores, a partir das informações de consumo, demanda e custos que podem ser geradas por simulações horárias/sub horárias.

Com relação aos tipos de uso final, diametralmente oposto as referências nacionais, e mais antigas, o consumo de energia com frio alimentar (49%) foi o protagonista, com iluminação (31%) na segunda posição de maior consumo, seguido por AVAC (15%) e por equipamentos (5%). Resultado consistente com AERG, 2013. O autor atribui as variações entre esses textos à capacidade instalada e estratégia de produção de frio alimentar em cada estabelecimento. A estratégia de uma central térmica demonstrou ótimo coeficiente de performance, 4,92 kW/kW, e flexibilidade ao atender balcões resfriados e salas de preparo. O sistema dutado garantiu versatilidade e redundância, através dos acionamentos independentes, a um baixo custo energético, em função da rotação variável dos seus compressores.

Por fim, buscando reduzir a intensidade do uso de energia do modelo de referência, estimada em 305 kW.h/m²/ano, foi simulada uma solução híbrida, de iluminação natural e automação do sistema de iluminação. Esta análise sinalizou que esse índice poderia ser reduzido a 278 kW.h/m²/ano, promovendo uma economia da ordem de 110 mil reais por ano. Além de uma redução no pico de demanda na ordem de 15%, pôde-se estimar o retorno do investimento em quatro anos e meio. Para trabalhos futuros, espera-se simular e estudar o consumo de energia em centrais térmicas com fluido secundário no nível de congelados.

8. REFERÊNCIAS

- AERG, 2013. “Advanced Energy Retrofit Guide: Practical Ways to Improve Energy Performance – Grocery Stores”, National Renewable Energy Laboratory, June, 2013.
- AlDent, 2015. Orçamento referente a projeto e execução de automação de sistema de iluminação em 25/11/2015.
- ANVISA, 2003. Resolução 09. Agência Nacional de Vigilância Sanitária.
- ASHRAE, 2004. “Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings”, ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2004, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.
- ASHRAE, 2013a. Chapter 19 - Energy Estimating and Modeling Methods. ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
- ASHRAE, 2013b. Chapter 26 - Heat, Air and Moisture Control in Building Assemblies – Material Properties. ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
- ASHRAE, 2013c. Chapter 18 – Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations.. ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
- Beck, J.V., and K.J. Arnold, 1977. Parametric estimation in engineering and science. John Wiley & Sons, New York.
- In: ASHRAE, 2013a.
- Cummins, 2011. Catálogo técnico do grupo gerador C450D6 - Revisão 03. Cummins Brasil Ltda. Abril, 2011.
- EN 12.900, 2013. Refrigerant compressors. Rating conditions, tolerances and presentation of manufacturer's performance data. European Standard, Inglaterra.
- Fischer, C., 2015. Entrevista pessoal concedida pessoalmente em 30/11/2015, às 18:30.
- Góes, R., 2015. Entrevista pessoal concedida por rede social em 16/11/2015 às 16:00.
- Hitachi, 2014. Manual de instalação de unidades modulares – Linha RVT/RTC e RUV/RUT. Revisão 01. Hitachi Ar Condicionado do Brasil Ltda.
- NBR 16.401, 2008. Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- NREL, 2011. U.S. Department of Energy - Commercial Reference Building Models of the National Building Stock. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report 5500-46861.
- PANESI, A. R. Q. Eficiência Energética em Supermercados. 2º Encontro de Engenharia e tecnologia dos Campos Gerais, 14 e 15 de agosto de 2008.
- Rabl, A. 1988. Parameter estimation in buildings: Methods for dynamic analysis of measured energy use. Journal of Solar Energy Engineering 110:52-66. In: ASHRAE, 2013a.
- Roriz, 2012. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos/SP, Brasil.
- Sunoptics, 2013. Catálogo técnico da linha “Signature Series - Frame Model 800 MD”. 2013.

Abstract. As a building energy audits tool, this text indicates an energy use intensity, EUI, of 305 kW.h/m²/ year for a supermarket average standard, with 5.962 m² of floor area, located in Capão da Canoa/RS. The average cost of electricity was estimated at 0,732 R\$/kW.h. The food refrigeration energy consumption (49%) was the protagonist, with lighting (31%) in the second highest consumption, followed by HVAC (15%) and equipment (5%). Consistent result with AERG, 2013. To reduce the energy footprint of the building, was simulated a proposal with 47 roof windows diffusive and lighting controlled by light meter. The simulations indicated a potential savings around hundred and ten thousand reais per year, a reduction in the EUI for level 278 kW.h / m²/year and a payback in four years and a half.

-Keywords: Building energy simulation, energy audits, supermarket, food refrigeration.