

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EM TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA AR-AR (ENERGY RECOVERY VENTILATORS - ERV) APLICADAS EM SISTEMAS DE AR CONDICIONADO E VENTILAÇÃO

Matheus Sodré Valverde – theuvalverde@gmail.com

João Pimenta – pimenta@unb.br

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Ar condicionado e Refrigeração – LaAR, www.enm.unb.br

S2 – COMPONENTES E EQUIPAMENTOS DE TRATAMENTO DE AR

Resumo. *Recuperação de energia ar-ar é o processo de recuperação de calor e/ou umidade entre duas correntes de ar a diferentes temperaturas e umidades. Esse processo é importante na manutenção da Qualidade do Ar Interior (QAI) e, ao mesmo tempo, reduz os custos de operação e o consumo global de energia. Dispositivos que transferem tanto calor quanto umidade são conhecidos como dispositivos de energia ou entálpicos ou ventiladores recuperadores de energia (Energy Recovery Ventilators – ERVs), e os que transferem apenas calor são conhecidos como HRV (Heat Recovery Ventilators). O presente trabalho apresenta uma revisão da literatura em relação aos equipamentos recuperadores de energia aplicados em sistemas de ar condicionado, mostrando o atual estado da arte em que essa tecnologia se encontra, englobando os tipos mais usados desses equipamentos. Essa revisão contempla projetos experimentais, simulações computacionais e diferentes abordagens de aplicações para cada tipo de equipamento. Ainda, é apresentada a relação entre os códigos de eficiência energética e as tecnologias de recuperação de energia e vazão de ar variável, com o objetivo de mostrar que tais tecnologias apresentam efeitos consideráveis de economia de energia. Além disso, são apresentadas as categorias da certificação LEED que conferem créditos para essas tecnologias.*

Palavras-chave: *Recuperação de energia, energy recovery ventilators, eficiência energética, vazão de ar exterior variável*

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, a necessidade pela conservação de energia tem recebido maior atenção no campo das pesquisas científicas e tecnológicas. Associado a esse fato, discussões acerca dos impactos ambientais causados pelo crescimento desenfreado das populações se tornaram mais constantes. Assim, diversas pesquisas nas mais variadas áreas das ciências tem sido desenvolvidas com o intuito de buscar tecnologias que aumentem a eficiência dos sistemas atuais e diminuam os impactos ambientais causados.

Uma das principais preocupações do país é a questão energética. O crescimento industrial e demográfico exige cada vez mais dos recursos de energia. O Brasil vem fazendo constantemente programas de racionalização para diminuir a demanda. De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) a potência demandada por instalações de ar condicionado e refrigeração é da ordem de 14.000 MW, representando 11,8% da capacidade instalada no país. Dessa forma, soluções mais eficientes também são necessárias nos diversos sistemas de engenharia, de maneira a manter as mesmas funções e exceder a eficiência exigida por sistemas anteriores. Esse é caso em sistemas de Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado (AVAC), que são sistemas requeridos para prover conforto térmico e qualidade do ar interno em edifícios ou escritórios, com razoáveis custos de instalação, manutenção e operação.

É notório o desenvolvimento de equipamentos e meios para diminuir e evitar maiores danos ao ambiente em sistemas AVAC. Exemplo disso são as substituições de fluidos refrigerantes por outros mais ecológicos (como os hidrocarbonetos), soluções alternativas para climatização como o resfriamento evaporativo, o aumento da eficiência de trocadores de calor, bombas e compressores, demandando assim uma menor quantidade de energia. Entretanto, tais equipamentos devem ser alocados em uma concepção de projeto que também prime por requisitos de eficiência.

Os projetos de climatização atuais devem levar em conta diversos critérios que visam à eficiência e redução do impacto ambiental. Dentre estes, podem ser citados os critérios de operação do sistema em cargas térmicas parciais, o que requer sistemas capazes de modular seu funcionamento, de maneira eficiente. Sistemas que não operam em cargas parciais geram um alto consumo energético, já que estará sempre atuando em carga máxima, mesmo que o ambiente não demande tal carga térmica. Além da preocupação com a operação em cargas parciais, outro requisito importante é a utilização de meios que garantam a regeneração de calor que inicialmente seria rejeitado para o meio. Nesse requisito, encontram-se os regeneradores de calor alocados entre o ar de exaustão e a tomada de ar externo nos sistemas atuais. Esse equipamento tem como objetivo realizar uma troca de calor, por meio de condução indireta, do ar frio que é retirado da sala com o ar quente obtido do ambiente externo. Dessa forma, o equipamento de climatização precisaria retirar uma menor quantidade de calor do ar da mistura, reduzindo o consumo de energia.

Outro requisito importante em sistemas AVAC é o da qualidade do ar interno. Apesar de não ser recente, com a normatização de parâmetros de conforto e qualidade do ar por órgãos brasileiros e internacionais, o assunto tem entrado cada vez mais em pauta, estando presente em praticamente todos os projetos que visem conforto térmico. Além disso,

análises da qualidade do ar têm sido realizadas em edifícios, de forma a verificar se os parâmetros estão de acordo com as normas, além de ser uma espécie de auditoria da manutenção e operação do sistema de AVAC local. Nesse sentido, tendo em vista que a introdução de ar externo no sistema acarreta em aumento de carga térmica devido aos parâmetros de temperatura de bulbo seco e umidade absoluta, estudos em relação às vazões necessárias de ar de renovação também são de fundamental importância quando se trata aspectos de eficiência energética. Tal situação leva à utilização de sistemas com renovação de ar variável.

Assim, o uso de sistemas tradicionais de AVAC que requerem altas taxas de renovação de ar irá demandar também uma maior potência de ventilação para atender às demandas do edifício. Junto a esse fato, serão necessários maiores climatizadores de ar, com maiores serpentinas e ventiladores. Esse conjunto de fatores leva a um sistema superdimensionado e que não prima pelos requisitos de conservação de energia. Portanto, estudos direcionados para as análises das vazões ideais de renovação de ar, associadas ainda com regeneração de energia, tem grande potencial para a economia de custos significativos nas fases de concepção, dimensionamento do sistema, operação e manutenção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Regulamentos de eficiência energética e o ERV

O setor da construção civil consome, ainda hoje, aproximadamente um terço da energia primária utilizada na maioria dos países em desenvolvimento, o qual, além da emissão de toneladas de dióxido de carbono e esgotamento das fontes de energia, envolve um custo da ordem de milhões (Colmenar-Santos et al, 2013). Esse fato tem tornado como prioridade as estratégias de eficiência e economia energética nas políticas de energia da maioria dos países (Perez-Lombard et al, 2008). Além disso, esse setor oferece grande potencial para reduzir o consumo de energia primária e a emissão de dióxido de carbono a partir da redução de demandas de aquecimento, aumento da eficiência nas cadeias de abastecimento energético e o aumento do uso de recursos renováveis para materiais e combustíveis. Diversas estratégias podem ser utilizadas para consumação desse potencial, incluindo requisitos de eficiência energética em normas aplicadas à construção, especificando, por exemplo, exigências mínimas de eficiência energéticas para os edifícios (European Commission, Action Plan for Energy Efficiency, 2006).

O consumo de energia de um escritório ou edifício comercial durante o seu tempo de vida operacional é significativamente maior que a energia incorporada nos materiais e na construção (Claridge et al, 1994). Dessa forma, cada vez mais esforços têm sido empregados no sentido de conferir ao edifício e às suas instalações um nível maior de eficiência, atendendo aos requisitos e padrões de normas nacionais e internacionais, definidos por meio de leis, normas, códigos, estratégias, políticas ou sistemas de certificação. Dentre as diversas instalações existentes, os sistemas de AVAC são os maiores consumidores de energia das edificações não residenciais, correspondendo por cerca de 10-20% do consumo final de energia em países desenvolvidos (Perez-Lombard et al, 2008).

Perez-Lombard et al (2011) analisaram o desenvolvimento dos códigos de eficiência energética de sistemas de AVAC para edificações em relação ao seu escopo e conformidade. Foram analisados 12 (doze) dos principais códigos de eficiência energética de edifícios espalhados pelo mundo, cobrindo mais de 30 (trinta) nações em quatro continentes distintos. Também, foram classificadas 6 (seis) categorias de prescrições normativas que serviriam como base para uma seleção eficiente dos diversos componentes de sistemas de AVAC: a) eficiência mínima de equipamentos; b) sistemas de distribuição de fluidos; c) sistemas de controle; d) ventilação de ar externo; e) recuperação de energia; f) ciclo economizador.

A ventilação de ar externo é um requisito obrigatório para a obtenção de uma aceitável Qualidade do Ar Interior (QAI). As normas geralmente definem um valor mínimo de vazão de ar exterior e de nível de filtragem visando à redução da concentração dos contaminantes do ar a níveis aceitáveis. Os sistemas de ventilação geralmente usam energia térmica para tratamento do ar exterior e energia elétrica para filtragem e distribuição do ar nos espaços condicionados, consequentemente, os requisitos de QAI estão diretamente associados à eficiência energética em sistemas de AVAC (Perez-Lombard et al, 2011). Dessa forma, quanto maior a taxa de renovação de ar, maiores o consumo de energia e os custos de operação dos sistemas de climatização. Assim, tendo em vista que as vazões de ar externo são dimensionadas geralmente com base na área do espaço condicionado e no número de ocupantes, as taxas mínimas são estimadas considerando-se o número máximo de ocupantes. Por esse motivo é recomendável que os sistemas de AVAC sejam ajustáveis, de modo que as taxas de ventilação possam ser reduzidas de acordo com a demanda, evitando uma ventilação em excesso (Perez-Lombard et al, 2011).

Em termos gerais, as cargas térmicas de resfriamento ou aquecimento da ventilação de ar externo constituem de 20% a 40% da carga térmica total para edifícios comerciais (ASHRAE, 1997). Felizmente, uma grande fração dessa energia requerida para condicionar o ar externo pode ser recuperada se os ventiladores de recuperação de energia são utilizados (energy recovery ventilators - ERV) (Dorer and Breer 1998).

As tecnologias de recuperação de energia, outra categoria de prescrição normativa abordada, são bem conhecidas e amplamente utilizadas como medida de eficiência energética tanto na construção civil como na indústria. Dentre os principais processos de recuperação de energia em instalações de AVAC, pode-se destacar a recuperação térmica a partir do ar de exaustão. O ar externo adentra o edifício nas condições climáticas externas e é exaurido aproximadamente nas condições internas. Esse processo requer, consequentemente, a adição ou extração de carga térmica de ventilação. A energia térmica do ar exaurido pode ser recuperada para pré-aquecer ou resfriar o ar externo de renovação, gerando uma redução na carga térmica devido à ventilação (Perez-Lombard et al, 2011).

2.2 Pontuação LEED para sistemas com vazão de ar exterior variável e recuperação de energia

A especificação e utilização de sistemas recuperadores de energia e com vazão de ar exterior variável podem contribuir de forma significativa para a obtenção de créditos LEED em projetos de Novas Construções, Edifícios Existentes, Interiores de Edificações Comerciais e outros. Esses sistemas podem contribuir em até três categorias: i) Qualidade dos ambientes internos da edificação (*Indoor Environmental Quality*); ii) Energia e Atmosfera (*Energy & Atmosphere*); iii) Inovações empregadas em projeto (*Innovation Priority Credits*). Essas categorias e os requisitos são melhores detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 – Pontuação LEED para sistemas com recuperação de calor e vazão de ar exterior variável

Categoria LEED	Descrição	Requisito	Créditos possíveis
Energia & Atmosfera EA Crédito 1	Otimização do desempenho energético	A ventilação de em edifícios energeticamente eficientes pode ser responsável por 50% ou mais dos custos totais estimados de energia. ERV e vazão de ar variável podem economizar de 50% a 70% da carga total de ventilação.	7 – 12 pontos (Novas Construções) 10 – 14 (Edifícios Existentes)
Qualidade do Ambiente Interno EQ Crédito 1	Monitoramento da ventilação de ar externo	O uso de controle/monitoramento por concentração de CO ₂ permite uma taxa de ventilação de ar externo a fim de prover os requisitos de Qualidade do Ar Interior.	1 ponto
Qualidade do Ambiente Interno EQ Crédito 2	Aumento da ventilação de ar externo	Métodos que fornecem, com fácil aplicação e eficiência, uma taxa de ventilação superior a 30% das prescrições da norma ASHRAE 62.1	1 ponto
Qualidade do Ambiente Interno EQ Crédito 3.1,5	Construção de um plano de gerenciamento da Qualidade do ar Interior; Controle químico de fontes poluentes	Utilização de filtros de ar com alto desempenho (MERV 8 à 13) para manutenção de um ambiente interno limpo com a utilização de ventilação mecânica.	1 ponto (IEQ 3.1) 1 ponto (IEQ 5)
Qualidade do Ambiente Interno EQ Crédito 7.1	Projeto de conforto térmico	A utilização de equipamentos de ERV mantém os requisitos de conforto térmico na maioria das condições climáticas, sem a utilização adicional de serpentinas de umidificação ou desumidificação.	1 ponto
Inovações e Processos ID Crédito 1	Inovação em projeto	Projetos criativos de instalações	1 – 5 pontos
Inovações e Processos ID Crédito 2.1	Profissional com acreditação LEED	Suporte de profissional com acreditação LEED nas fases de projeto dos sistemas de ventilação.	1 ponto

2.3 Equipamentos de recuperação de energia ar-ar

Os equipamentos que realizam esse processo são chamados de recuperadores de energia ar-ar (*air-to-air energy recovery equipment*). Os recuperadores de energia entre fluxos de ar podem ser divididos em dois grupos: i) sistemas de recuperação que transferem apenas calor sensível (*heat recovery ventilator* – HRV); ii) sistemas de recuperação de calor e umidade que transferem tanto calor sensível quanto calor latente (*energy recovery ventilator* – ERV). No passado, as pesquisas tiveram como foco apenas a recuperação de calor sensível, sendo desprezado o tratamento da umidade do ar da ventilação externa. Esses sistemas utilizam normalmente trocadores de calor tradicionais como os trocadores de pla-

cas fixas (*fixed plates*), rodas trocadoras de calor sensível (*sensible heat exchange wheels*), tubos de calor (*heat pipes*), trocadores de calor por meio de bombeamento de fluido em serpentina (*run-around loop heat exchangers*); os quais possuem fácil implementação.

Dhital et al (1995) investigaram os efeitos do sistemas de trocadores de calor por meio de bombeamento de fluido em serpentina (*run-around heat exchangers*) no consumo de energia e na análise de custo do ciclo de vida energético (*life cycle cost analysis -LCCA*) de um edifício de escritórios típico. As simulações foram feitas em 4 (quatro) cidades americanas e os resultados apresentaram economias anuais de energia de até 4,8%, associadas com redução de até 8% na capacidade dos chillers.

Johnson et al (1995) dimensionaram e simularam um sistema de bombeamento de fluido em serpentina (*multiple-coil run-around system*) em um amplo range de condições de operação, desde climas frios à climas quentes com altas cargas térmicas de resfriamento. Foi realizada uma simulação anual com base em informações horárias de temperatura e umidade, em que foi possível determinar os custos operacionais anuais e as economias devidas ao uso do sistema. Para o edifício típico analisado, o período de retorno do investimento dos sistemas de recuperação de energia aplicados foi menor que 3,4 anos.

Manz et al (2000) investigaram uma unidade de ventilação com recuperação de calor em uma sala única, a partir de análises numéricas e experimentais, em relação aos requisitos de eficiência na ventilação, conforto térmico, recuperação de calor, consumo de energia elétrica e parâmetros acústicos. Usando essas unidades de ventilação, foram mostradas que a sala foi ventilada com eficiência (eficiência de troca de ar igual a 0,6) em um ótimo nível de conforto térmico, apresentando ainda razoável economia de energia devido à recuperação de calor utilizada.

Nos últimos anos, uma crescente atenção tem sido dada à recuperação de energia, também chamada de recuperação entálpica, no qual tanto o calor sensível quanto o calor latente são recuperados. A técnica de recuperação de entalpia se baseia principalmente nos processos de sorção alternada (absorção e adsorção) e regeneração, a partir da utilização de materiais dessecantes, quer sob a forma de leitos cíclicos fechados (*cycling packed beds*) (San, 1993) ou rodas giratórias (rodas entálpicas) (*rotary wheels or rotary enthalpy wheels*).

Klein et al (1990) desenvolveram um modelo computacional de um trocador ar-ar entálpico com um dessecante sólido. Foram estabelecidas correlações para as quais a eficiência entálpica do trocador seria máxima, e definida como função apenas do número unitário de trocas (*number of transfer unit - NTU*). As correlações apresentadas se mostraram eficazes para determinadas condições de operação aonde existe troca entálpica.

Stiesch et al (1995) estudaram recuperadores de energia do tipo rodas entálpicas giratórias aplicadas em edifícios, com o objetivo de analisar sua eficiência anual. Foram analisados edifícios de escritórios em três cidades americanas, com taxa de ventilação de acordo com a norma da ASHRAE à época (20 cfm/pessoa). Foram analisadas as economias no consumo de energia, tanto para aquecimento quanto para resfriamento, durante 15 anos, para trocadores de entalpia e trocadores de calor sensível, apenas. As economias acumuladas foram da ordem de \$28.000 à \$38.000 para o trocador entálpico e de \$7.000 a \$24.000 para o trocador de calor sensível.

Simonson e Besant (1998) apresentaram e validaram experimentalmente um modelo numérico para análise de rodas entálpicas com transferência de calor, umidade, condensação e congelamento. A presença de condensado e gelo aumenta com a umidade em certos níveis de umidade relativa do ar, se acumulando permanentemente na roda entálpica. Foram estudadas as sensibilidades aos processos de condensação e congelamento em rodas entálpicas com dois tipos de materiais dessecantes: i) dessecante com um tipo de sorção isotérmica (ex: peneira molecular); ii) dessecante com sorção isotérmica linear (ex: sílica gel). Os resultados da simulação mostraram que o dessecante com curva de sorção linear é mais favorável para a recuperação de energia, pois tem melhores características de eficiência e menores quantidades de condensação/congelamento em condições de operação extremas.

Simonson e Besant (1999a) apresentaram os grupos adimensionais fundamentais para os trocadores ar-ar tipo rodas entálpicas (*rotary wheels*) que transferem calor sensível e vapor de água. Esses grupos são derivados das equações governantes de transferência de calor e massa acopladas. Ao contrário das rodas de energia que trocam apenas calor sensível, a eficiência das rodas entálpicas é função das condições operacionais de temperatura e umidade, conforme verificado por diversos fabricantes e pesquisadores. Simonson e Besant (1999b) conferiram o significado físico para esses grupos adimensionais e os utilizaram para desenvolver correlações de eficiência para as rodas de energia. As correlações de eficiência apresentadas permitem ao projetista prever as eficiências de calor sensível, latente e total das rodas de energia quando as condições de operação são conhecidas. Os resultados mostraram que a sua eficiência total pode ser maior que 70%.

Além das rodas entálpicas, existe outro tipo de tecnologia de recuperação entálpica baseada em placas de membrana (*membrane plates*), que são uma variação da tecnologia de recuperação de calor sensível do tipo placas fixas (*fixed plates*). Membranas têm sido bastante utilizadas nos processos de separação umidade/ar em processos industriais ao longo dos anos (Pan et al, 1978; Asaeda and Du, 1986; Wang et al, 1992; Cha et al, 1996). Entretanto, embora os produtos que utilizam membranas hidrofílicas para recuperação de entalpia sejam disponíveis no mercado, suas eficiências na recuperação de energia de ventilação não foram amplamente documentadas até o início do século XXI como foram os produtos do tipo roda entálpica. O sistema de membrana se baseia na utilização de novas membranas hidrofílicas, permitindo que o calor e umidade sejam transferidos simultaneamente, ao contrário do trocador tradicional de placas fixas que troca apenas calor sensível. São fáceis de construir e instalar e requerem pequena manutenção.

Zhang e Jiang (1999) analisaram numericamente os processos simultâneos de transferência de calor e massa por meio de uma membrana hidrofílica, como uma descoberta fortuita por meio do desenvolvimento de uma bomba de umidade. Posteriormente, Zhang e Niu (2002) analisaram os mecanismos de transferência de calor e massa que ocorrem

em rodas dessecantes baseadas em um modelo bidimensional, em que foram discutidos os efeitos da espessura da parede sobre as velocidades de rotação ideais para aplicações de desumidificação e recuperação entálpica. A partir de simulações numéricas, foram calculadas as velocidades ideais visando a recuperação de calor sensível, de calor latente e de desumidificação do ar. Zhang et al (2000) investigaram as características das transferências de calor e massa de uma membrana permeável à água, com o intuito de criar uma referência visando a seleção de uma membrana apropriada para ventiladores de recuperação de energia (ERV). Os cálculos resultantes desse trabalho foram validados experimentalmente. Zhang e Niu (2001) compararam a economia de energia entre um ventilador de recuperação de energia (ERV) e um ventilador de recuperação de energia sensível apenas (HRV) no clima quente e úmido da cidade de Hong Kong. Os resultados da simulação sugeriram que quanto mais úmido o clima, melhores são os resultados do ERV em relação ao HRV.

Abe et al (2006) apresentaram um modelo analítico para prever a eficiência de rodas de energia usando apenas as características medidas na mesma roda em condições estacionárias expostas a mudanças de temperatura e umidade. A comparação entre as eficiências latente e sensível previstas em relação aos testes experimentais se apresentaram de acordo dentro de certos limites de incerteza. As simulações numéricas também apresentaram resultados coerentes dentro de certos limites.

Nasif et al (2005) avaliaram experimentalmente o desempenho em termos de eficiência sensível e latente de um recuperador de energia ar-ar tipo Z, que utiliza papel como superfície de transferência. Um modelo no software CFD (computational fluid dynamics) foi desenvolvido nesse estudo a fim de analisar a distribuição de calor e umidade, e os resultados foram validados experimentalmente a partir de medições em uma plataforma experimental.

Sphaier e Worek (2006) fizeram uma comparação entre as formulações matemáticas que descrevem o fenômeno de transporte que ocorre dentro das rodas entálpicas, incluindo efeitos da transferência de calor axial, da difusão de massa, e, ainda, uma versão simplificada sem considerar esses efeitos. Os resultados mostraram que a razão de aspecto do substrato dessecante, juntamente com o número de Biot, são parâmetros relevantes para determinar se a difusão axial deve ser incluída na análise.

Li et al (2005) propõem um novo tipo de unidade de ar externo que é composta basicamente por um líquido dessecante recuperador de entalpia e de um ciclo de refrigeração de pequena capacidade. Testes experimentais dessa unidade instalada em um hospital apresentaram uma taxa de eficiência energética (*energy efficiency ratio* - EER) variando entre 6.3-7.3 no verão e de 4.7-5.0 no inverno. O equipamento se mostrou confiável na eliminação de superfícies molhadas em sistemas de ar condicionado, proporcionando melhores qualidades no ar interior.

Yin (2006) propôs um novo tipo de recuperador de energia de placas fixas, utilizando membranas separadas de gás de nanocompósitos, cujos valores de eficiência entálpica alcançaram 75%, além de uma drástica redução na resistência do ar devido ao cancelamento da estrutura de papel corrugado.

Zhou et al (2007) simularam um sistema de ERV em dois locais da China com diferentes condições climáticas utilizando o software EnergyPlus, a partir de um modelo de simulação dinâmica das condições operacionais. Foi determinada uma nova variável, definida como a razão entre a recuperação de energia pela entrada total de energia no sistema de ar condicionado. Os resultados das simulações mostraram que a média sazonal dessa variável possui uma relação linear com os valores de temperatura interna do ambiente condicionado. Ainda, eles reportaram que a aplicação do ERV reduziu mais o consumo de energia durante o inverno em Shanghai do que em Pequim, e, durante o verão, a utilização do ERV em Pequim não foi econômica caso a temperatura interna do ambiente fosse maior que 24° C.

Fauchoux et al (2007) apresentaram os impactos indesejáveis de um ERV (roda entálpica) funcionando sem controle de operação em cargas de resfriamento em climas frios e amenos (Vancouver e Saskatoon, Canadá). Os resultados apontaram que a energia para resfriamento poderia ser reduzida utilizando-se uma estratégia de controle baseada na temperatura interna do ambiente. Ainda, foi possível verificar que a utilização do ERV nessas cidades conferiu melhorias na qualidade do ar interior e na redução da umidade relativa.

Mumma (2001) utilizou uma estratégia de controle para rodas entálpicas empregadas em sistemas dedicados de ar externo. A estratégia implementada não permitiu que o ERV operasse quando a entalpia do ar externo fosse menor que a entalpia do ar interno enquanto a umidade do ar externo fosse maior que a umidade necessária para o suprimento de ar no ambiente condicionado.

Os estudos mais recentes têm mostrado influência das condições de temperatura e umidade do ar externo no desempenho dos ERV. Esse fato gera a necessidade da avaliação do desempenho dos equipamentos de ERV em diversos locais, com condições climáticas distintas, e em diferentes estações do ano, para que sejam disponibilizados dados técnicos suficientes que embasem decisões de projetos que visem à utilização desses equipamentos. Ainda, a partir dessas análises aplicadas para cada local e estação do ano, é possível definir uma melhor estratégia de operação para cada equipamento, no sentido de maximizar seu desempenho ao longo do ano.

Yanming et al (2009) estudaram a aplicabilidade de sistemas ERV na China. Por causa das diferenças dos climas locais entre as regiões sul e norte da China, as frações de calor sensível e latente por unidade de vazão de ar externo são diferentes entre as regiões, assim como a eficiência global dos recuperadores de energia. Foi avaliada a composição anual do consumo de ar externo por unidade de vazão a partir dos dados climáticos de oito cidades analisadas. A análise verificou a aplicabilidade dos sistemas de ERV na China em diferentes condições de operação, de forma a atender às prescrições normativas de eficiência energética em edifícios comerciais chineses. Os resultados mostraram que a eficiência do recuperador de energia é significativamente maior que a eficiência do recuperador de calor sensível apenas, nas aplicações em sistemas de ventilação controlada em edifícios com pequena emissão de umidade ao longo do ano. Por esse fator, os preços dos ERV são maiores que dos HRV. Ainda, a relação entre os consumos de energia sensível e la-

tente são o fator chave para a utilização de um ERV ou de um HRV, uma vez que esses consumos dependem do clima, das condições de projeto do ar interno e das aproximações utilizadas para caracterização do ar externo. Dessa forma, foi mostrado que para climas quentes e úmidos a utilização do ERV é melhor que a do HRV. As análises apresentadas consideraram valores fixos para as eficiências globais dos recuperadores de energia e não foram abordadas questões relativas à vazão de ar variável e nem às perdas de carga inerentes aos equipamentos.

Rasouli et al (2010) estudaram a aplicabilidade e a definição de uma estratégia de controle ideal para recuperadores de energia em diferentes condições climáticas. Os impactos da utilização do ERV no consumo anual de energia para resfriamento e aquecimento foram investigados por meio de um modelo de um edifício comercial de dez pavimentos em quatro cidades americanas. Os resultados mostraram que a recuperação de calor e umidade pode levar a significativas reduções anuais no consumo de energia para aquecimento, acima de 40% de economia. Ainda, um ERV operando sob uma estratégia ótima de controle foi capaz de economizar acima de 20% no consumo anual de energia para cargas de resfriamento, dependendo da localização e da eficiência do recuperador. Foi mostrado também que um ERV sem controle de operação pode aumentar o consumo de energia para cargas de resfriamento durante o verão. Nesse sentido, uma estratégia de controle ótimo foi proposta, sendo comparada com o controle baseado na temperatura apenas. Esse controle depende do fator H, que relaciona as eficiências de calor sensível e latente do equipamento. Assim, dependendo da taxa de eficiência latente, a operação do ERV em estações com cargas de resfriamento estaria limitada a condições específicas do ar exterior, dentro de certos limites apresentados. Por exemplo, o controle ótimo de um ERV que possui valores iguais para as eficiências sensível e latente é quando o ar exterior possui maior entalpia ou maior temperatura que o ar interior. Os resultados da simulação, de acordo com as formulações teóricas, indicaram que um ERV pode operar em uma gama mais ampla para condições externas frias e úmidas quando o equipamento possui uma eficiência latente maior que a sensível. As análises apresentadas consideraram valores fixos (padrões da norma) para as eficiências globais dos recuperadores de energia, e em relação à vazão de ar exterior variável, foram levantados três níveis de variação de vazão apenas. Não foram abordadas questões relativas à perda de carga nos equipamentos.

Liu et al (2010) analisaram a eficiência de um ERV em diversas condições climáticas e seu desempenho na economia de energia em apartamentos residenciais. Nos dias atuais, ERV tem sido usado frequentemente em edifícios comerciais, industriais e residenciais na China. Baseando-se nas relações entre as eficiências de calor sensível, latente, e eficiência total, foram analisadas as equações com coeficientes ponderados que descrevem o desempenho do ERV em diferentes zonas climáticas na China. De acordo com as informações climáticas, a eficiência total do recuperador depende principalmente da eficiência de calor sensível no inverno e da eficiência de calor latente no verão. Assim, os desempenhos na economia de energia foram estudados em cinco condições climáticas distintas, também a eficiência total ou entálpica, a potência de ventilação consumida e certas variações na vazão de ar exterior. Os resultados mostraram que em condições de inverno e verão, o coeficiente ponderado de eficiência de calor sensível diminui com a diminuição da temperatura externa enquanto o coeficiente de eficiência de calor latente aumenta, porém essa tendência é mais suave no inverno. As potências de ventilação e também os percentuais de energia economizada aumentam com o aumento das taxas de ventilação de ar externo também.

Kim et al (2012) determinaram programações de operação de um HRV visando a maximização da economia de energia em grandes edifícios residenciais. Os resultados medidos mostraram que o consumo de energia de cada edifício foi reduzido quando o HRV foi operado de acordo com as taxas de ventilação recomendadas e em certas faixas de temperatura de conforto. As simulações apresentaram uma contribuição anual na economia de energia de 9,45% para cargas de aquecimento e 8,8% para cargas de resfriamento, quando o HRV operou de forma intermitente. Uma verificação importante foi de que o HRV é mais significativo para recuperação de energia quando são grandes as diferenças de temperatura entre o ar de exaustão do ambiente interno e o ar exterior. Por fim, o estudo sugeriu que a influência do HRV na melhoria da qualidade do ar interior (QAI) deve ser examinada em conjunto com a economia de energia provida pelo equipamento, uma vez que a aplicação dele no estudo em questão melhorou as condições do ar interno, já que as taxas de ventilação recomendadas foram mantidas em todo o período de análise.

Yaici et al (2013) analisaram numericamente a recuperação de energia em ERVs e HRVs de membranas utilizando o software CFD. O modelo proposto incluiu os mecanismos de transferência de calor e massa para escoamentos laminares a fim de investigar o desempenho térmico desses sistemas. Foram analisados equipamentos com fluxos paralelos em mesmo sentido e em contra corrente, nas estações de verão e inverno no Canadá. Os resultados numéricos confirmaram a superioridade na eficiência do recuperador de fluxo em contra corrente. Ainda, foi apresentada uma redução na eficiência dos recuperadores com o aumento na velocidade do ar externo de suprimento ou no ar interior de exaustão. A eficiência do ERV no verão foi maior em comparação com o inverno, sob as condições climáticas do Canadá. A estação do ano também mostrou efeito significativo no desempenho do HRV e na potência de ventilação consumida, cujo valor foi aproximadamente 18% maior no verão em relação ao inverno. Os resultados da análise do ERV mostraram que a temperatura e umidade relativa do ar exterior não tem efeito significativo na eficiência de calor sensível do recuperador, ao contrário da eficiência de calor latente, que aumenta com o aumento da umidade relativa tanto no verão quanto no inverno.

3. CONCLUSÕES

Existem diversos outros trabalhos que abordam a utilização de sistemas de ERV em aplicações de AVAC, porém, essas abordagens não se diferem muito do que foi apresentado. Em conclusão, o atual estágio do conhecimento de aplicações de recuperadores de energia, aliadas ainda com vazões variáveis de ar externo, deixa clara a possibilidade de se

analisar os efeitos de economia de energia e financeira dessas técnicas em sistemas de AVAC operando em condições climáticas do Brasil, uma vez que não existem dados disponíveis na literatura nesse sentido, levando-se em conta ainda os efeitos dessas técnicas na qualidade do ar interior dos ambientes, em confronto com as exigências das normas brasileiras. Ainda, percebe-se na literatura uma lacuna em relação a abordagens mais apropriadas para as estimativas das eficiências de calor sensível, latente e total dos recuperadores. A maioria dos estudos utilizam valores de eficiências de normas, ou valores fixos que não consideram sua variação com outros parâmetros, ou ainda consideram sua variação apenas com a vazão ou com os efeitos de temperatura e umidade do ar externo de forma separada. Nesse sentido, a proposição de um modelo que inclua os diversos efeitos agindo de forma conjunta traria melhorias significativas nas estimativas de economia de energia e de retorno de investimento.

4. REFERÊNCIAS

- ANEEL, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012.
- ASAEDA, M.; DU, L.D. Separation of alcohol/water gaseous mixtures by thin ceramic membrane. *J. Chemical Engng. Jpn.* 19: 72-77, 1986.
- ASHRAE Handbook Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1997.
- CHA, J.S.; LI, R.; SIRKAR, K.K. Removal of water vapor and VOCs from nitrogen in a hydrophilic hollow fiber gel membrane permeator. *J. Membrane Sci.* 119: 139-153, 1996.
- CLARIDGE, D.E.; HARBERL, J.; LIU, M.; ATHAR, A. Can you achieve 150% of predicted retrofit savings?, in: Proceedings of the ACEEE 1994 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, American Council for an Energy Efficient Economy, Washington, DC, 1994.
- COLMENAR-SANTOS, A.; DE LOBER, L.N.T.; BORGE-DIEZ, D.; CASTRO-GIL, M. Solutions to reduce energy consumption in the management of large building, *Energy and Buildings* 56, 2013.
- DHITAL, P.; BESANT, R.W.; SCHOENAU, G.J. Integrating run-around heat exchanger systems into the design of large office buildings, *ASHRAE Transactions* 101 (2), 1995
- DIRECTIVE 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance Buildings, 2002.
- DORER, V.; BREER, D. Residential mechanical ventilation systems: Performance criteria and evaluations, *Energy and Buildings* 27(3): 247-255, 1998.
- EUROPEAN COMMISSION, ACTION PLAN FOR ENERGY EFFICIENCY: Realising the Potencial, 2006, disponível em: <http://ec.europa.eu> (acessado em 10 de abril, 2013).
- FAUCHOUX, M.T.; SIMONSON, C.J.; TORVI, D.A. The effect of energy recovery on perceived air quality, energy consumption, and the economics of an office building. *ASHRAE Transactions* 113, 2007.
- JOHNSON, A.B., C.J. SIMONSON, and R.W. BESANT. Uncertainty analysis in the testing of air-to-air heat/energy exchangers installed in buildings. *ASHRAE Transactions* 104(1B):1639-1650. 1998.
- JOHNSON, A.B.; BESANT, R.W.; SCHOENAU, G.J. Design of multi-coil run-around heat exchanger systems for ventilation air heating and cooling. *ASHRAE Transactions* 101(2): 967-978, 1995.
- KIM, S.M.; LEEB, J.H.; KIM, S.; MOOND, H.J.; CHOE, J. Determining operation schedules of heat recovery ventilators for optimum energy savings in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings* 46, 2012
- KLEIN, H.; KLEIN, S.A.; MITCHELL, J.W. Analysis of regenerative enthalpy exchangers. *Int. Heat Mass Trans.* 33(4): 735-744, 1990.
- LI, Z.; LIU, X.; JIANG, Y.; CHEN, X. New type of fresh air processor with liquid desiccant total heat recovery. *Energy and Buildings* 37, 2005.
- LIU, J.; LI, W.; LIU, J.; WANG, B. Efficiency of energy recovery ventilator with various weathers and its energy saving performance in a residential apartment, *Energy and Buildings* 42, 2010.
- MANZ, H.; HUBER, H.; SCHALIN, A.; WEBER, A.; FERRAZZINI, M.; STUDER, M. Performance of single room ventilation units with recuperative or regenerative heat recovery. *Energy and Buildings* 31(1): 37-47, 2000.
- NASIF, M.S.; MORRISON, G.L.; BEHNIA, M. Heat and mass transfer in air to air enthalpy heat exchangers. Proceedings of the 6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Matsu-shima, Japan, 2005.
- PEREZ-LOMBARD, L.; et al. A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings* 40, 2008.
- PEREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; CORONEL, J.F.; MAESTRE, I.R. A review of HVAC systems requirements in building energy regulations, *Energy and Buildings* 43, 2011.
- RASOULI, M.; SIMONSON, C.; BESANT, R. Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions, *Energy and Buildings* 42, 2010.
- SAN, J.Y.; Heat and mass transfer in a two-dimension cross-flow regenerator with 2 solid conduction effect. *Int. J. Heat Mass Transfer* 36(3): 633-641, 1993.
- SIMONSON, C.J.; BESANT, R.W. Energy wheels effectiveness: Part I – Development of dimensionless groups. *Int. J. Heat Mass Transfer* 42: 2161-2170, 1999a.
- SIMONSON, C.J.; BESANT, R.W. Energy wheels effectiveness: Part II – Correlations. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1999b.

- SIMONSON, C.J.; BESANT, R.W. Heat and moisture transfer in energy wheels during sorption, condensation, and frosting conditions. ASME J. Heat Transfer 120:699-708, 1998.
- SPHAIER, L.A.; WOREK, W.M. The effect of axial diffusion in desiccant and enthalpy wheels, Int. Journal of Heat and Mass Transfer 49, 2006.
- WANG, K.L.; MCCRAY, S.H.; NEWBOLD, D.D.; CUSSELER, E.L. Hollow fiber air drying. J. Membrane Sci. 72: 231-244, 1992.
- YAICI, W.; GHORAB, M.; ENTCHEV, E. Numerical analysis of heat and energy recovery ventilators performance based on CFD for detailed design, Applied Thermal Engineering 51, 2013.
- YIN, P. Research on a new type of plat air-to-air energy recovery ventilator: product development and experiments, HV&AC 35, 2005.
- ZHANG, L.Z.; JIANG, Y. Heat and mass transfer in a membrane-based energy recovery ventilator. J. Membrane Sci. 163: 29-38, 1999.
- ZHANG, L.Z.; JIANG, Y.; ZHANG, Y.P. Membrane-based humidity pump: performance and limitations. J. Membrane Sci. 171: 207-216, 2000.
- ZHANG, L.Z.; NIU, J.L. Effects of wall thickness on the heat and moisture transfers in desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery. Int. Communications in Heat and Mass Transfer 29 (2), 2002.
- ZHANG, L.Z.; NIU, J.L. Membrane-based enthalpy exchanger: Material considerations and clarification of moisture resistance. J. Membrane Sci. 189 (2): 179-191, 2001.
- ZHOU, Y.P.; WU, J.Y.; WANG, R.Z. Performance of energy recovery ventilator with various weathers and temperature set-points, Energy and Buildings 39, 2007.

LITERATURE REVIEW ON AIR-TO-AIR ENERGY RECOVERY EQUIPMENT (ERV) APPLIED IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

Abstract. AIR-TO-AIR energy recovery is the process of recovering heat or/and moisture between two airstreams at different temperatures and humidities. This process is important in maintaining acceptable indoor air quality (IAQ) while maintaining low energy costs and reducing overall energy consumption. Equipment that perform this process are called Energy Recovery Ventilator - ERV (when energy is recovered either in its sensible and latent form) or Heat Recovery Ventilator – HRV (when energy is recovered only in its sensible form). This paper presents a review of the literature regarding energy recovery equipment applied in air conditioning systems, showing the current state of the art in this technology, encompassing the most used types of such equipment. This review covers experimental field projects, computer simulations and applications of different approaches for each type of equipment. Still, this paper presents the relationship between energy efficiency codes and technologies for energy recovery and variable air flow, aiming to show that such technologies have considerable effects of energy savings, including as part of some categories of LEED certification, which gives credits for these technologies.

Key words: Energy recovery ventilators, energy recovery, variable outside air flow, energy efficiency