

RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO HOSPITALAR APLICADOS A QUARTOS DE INTERNAÇÃO DE UNIDADES DE TERAPIA INTENSIVA NA ÁREA QUEIMADOS

Gabriel Franceschini Tocchetto, gabriel@treengenharia.com

Orientador: Professor Bruno De Rosso Ribeiro.

Resumo. *Este trabalho apresenta a análise de uma solução alternativa para o projeto de climatização da Unidade de Terapia Intensiva (UTI) de queimados do Hospital de Pronto Socorro de Porto Alegre. Considerando as exigências da norma NBR 7256 para renovação e exaustão total do ar sem recirculação, foi avaliado o impacto da utilização de sistemas de recuperação de calor em relação ao consumo energético e eficiência do projeto. A metodologia incluiu o cálculo de carga térmica individual por quarto e o dimensionamento de equipamentos necessários para dois cenários: um sistema convencional sem recuperação de calor e outro com uma Unidade de Tratamento de Ar Externo (UTAE) equipada com um trocador de calor de fluxo cruzado. Os resultados demonstraram que o sistema sem recuperação de calor geraria uma carga térmica total de 33,9 TR, implicando em maior consumo energético, maior complexidade estrutural e custos elevados. Por outro lado, a inclusão de um sistema com recuperação de calor reduziu a carga térmica para 28,2 TR, permitindo maior eficiência energética, redução do tamanho e custo dos equipamentos e maior compatibilidade com as limitações estruturais do edifício hospitalar. Conclui-se que a adoção do sistema com recuperação de calor é a alternativa mais eficiente e sustentável, atendendo às normas de qualidade do ar e conforto térmico enquanto reduz custos operacionais e impactos estruturais no longo prazo.*

Palavras-chave: *Climatização Hospitalar. Recuperação de Energia. Trocador de Calor de Fluxo Cruzado. Eficiência Energética.*

1. INTRODUÇÃO

O propósito deste artigo é examinar uma alternativa para o projeto de climatização do Hospital de Pronto Socorro de Porto Alegre, concentrando-se no conforto térmico e na prevenção de infecções nos quartos individuais da Unidade de Terapia Intensiva de Queimados, situada no sexto andar da construção. A previsão do sistema de climatização inclui a utilização de Unidades de Tratamento de Ar específicas para cada quarto. Estas Unidades recebem energia de uma central térmica que é composta por resfriadores de líquidos de condensação a ar (Chillers).

O controle da qualidade do ar em ambientes hospitalares, particularmente em Unidades de Terapia Intensiva (UTI) voltadas para pacientes queimados, requer uma estratégia distinta e estrita no que diz respeito à climatização. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 7256, 2022), através da norma 7256, define critérios essenciais para a renovação e exaustão do ar nesses espaços, exigindo que o ar seja totalmente exaurido do local, sem que ele retorne ao sistema de climatização.

Em face dessa necessidade, o uso de Unidades de Tratamento de Ar com a utilização de 100% de ar externo implica em desafios e especificações técnicas mais rigorosas, pois o equipamento não utiliza o ar recirculado do ambiente, aumentando a demanda por unidades mais robustas. Este sistema, além de garantir a qualidade do ar necessária para o controle de infecções e proteção dos pacientes que estão expostos, resulta em um aumento significativo da capacidade de resfriamento necessária, o que acarreta em equipamentos mais robustos e, conseqüentemente, de custo mais elevado.

Em virtude dessa especificidade, o presente trabalho propõe a implementação de um sistema de recuperação de energia. Esse sistema será composto por uma Unidade de Tratamento de Ar dedicada ao tratamento do ar externo, equipada com um trocador de calor de fluxo cruzado e uma serpentina

de resfriamento, que permitirá a recuperação de energia térmica através de um fluxo cruzado entre o ar exaurido dos quartos climatizados e o ar externo que entra no sistema.

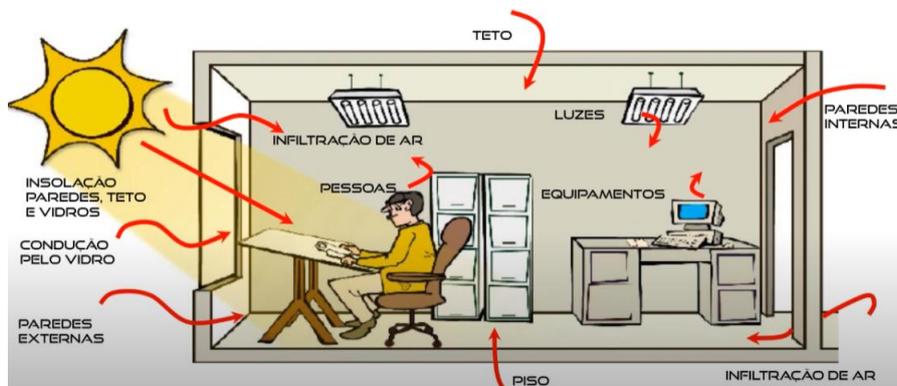
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Carga Térmica

A carga térmica é um fator crucial em projetos de climatização, referindo-se ao volume total de calor que precisa ser removido ou incorporado a um espaço para manter suas condições internas dentro dos padrões de conforto térmico previamente definidos. Esta condição de bem-estar, normalmente avaliada através da temperatura e umidade relativa, é resultado do equilíbrio entre as trocas de calor que acontecem no ambiente, sejam elas provenientes de fontes internas ou externas (ASHRAE, 2017). O entendimento sobre carga térmica é crucial para o dimensionamento correto dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC), garantindo que o sistema planejado funcione de forma eficaz e satisfaça as demandas do ambiente climatizado.

A carga térmica pode ser dividida em dois componentes principais: carga térmica sensível e carga térmica latente. A carga térmica sensível é responsável pelas variações de temperatura no ambiente, estando relacionada à quantidade de calor que deve ser removida ou adicionada para elevar ou reduzir a temperatura do ar. Por outro lado, a carga térmica latente refere-se à quantidade de calor associada às mudanças de estado da umidade presente no ambiente, como evaporação ou condensação, sem alteração na temperatura, impactando diretamente o controle da umidade relativa (Creder, 2003).

Figura 1. Representação gráfica das fontes geradoras de carga térmica em um ambiente (Adaptado de TRANE, 2011)



2.2 Psicrometria e Propriedades Psicrométricas

A psicrometria é a ciência que estuda as propriedades termodinâmicas do ar úmido e a interação entre o ar e a água em sua forma líquida ou vapor (Simões-Moreira e Neto, 2019). Essa área da termodinâmica é fundamental para a análise e o controle de processos envolvendo a climatização e o condicionamento de ambientes, especialmente em aplicações que exigem controle rigoroso de temperatura e umidade, como unidades de terapia intensiva, câmaras frigoríficas e ambientes de armazenamento de produtos sensíveis.

O estudo da psicrometria compreende o entendimento de parâmetros como temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa, pressão de vapor, entalpia e volume específico do ar úmido. Esses parâmetros são representados e analisados em diagramas psicrométricos, que permitem a visualização das condições do ar e as transformações que podem ocorrer, como aquecimento, resfriamento, umidificação e desumidificação (Ribeiro, 2022). A seguir as principais propriedades de Psicrometria serão melhor detalhadas:

Temperatura de bulbo seco: a temperatura do ar medida por um termômetro comum, sem levar em consideração o conteúdo de umidade do ar.

Temperatura de bulbo úmido: medida usando um termômetro envolto em um pano úmido. Ela considera a evaporação da água, o que reflete o teor de umidade no ar.

Umidade relativa (UR): é a relação entre a quantidade de vapor de água presente no ar e a quantidade máxima que ele poderia conter em uma determinada temperatura, expressa em porcentagem.

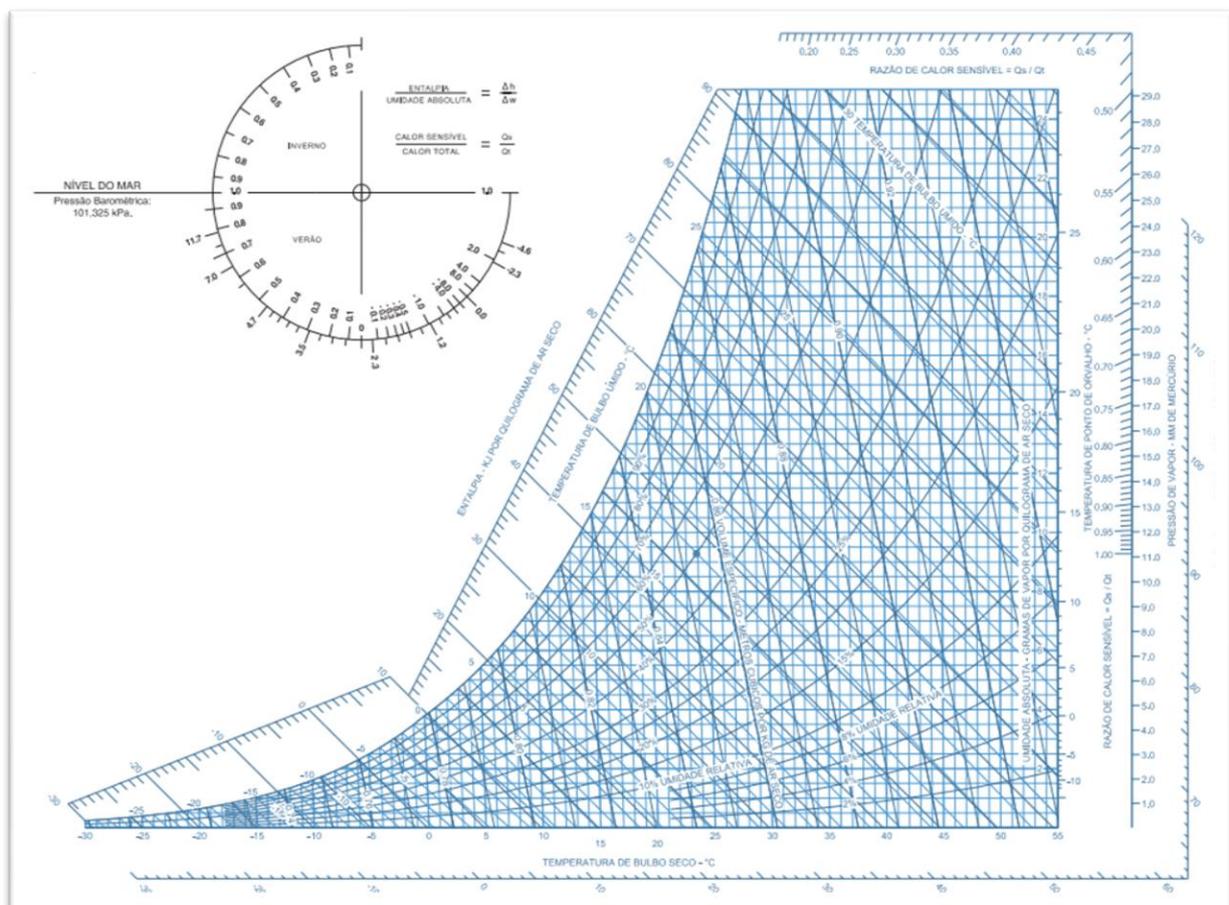
Umidade absoluta: quantidade de vapor d'água presente por unidade de ar seco, geralmente medida em gramas de vapor de água por quilograma de ar seco.

Entalpia: representa a quantidade de energia térmica contida na mistura de ar seco e vapor d'água, medida em kJ/kg.

Todos esses parâmetros são essenciais para a análise e o controle das condições do ar em sistemas de climatização, pois descrevem as propriedades termodinâmicas do ar úmido.

A temperatura de bulbo seco, a temperatura de bulbo úmido, a umidade relativa, a umidade absoluta e a entalpia estão interconectadas e podem ser determinadas de forma prática e visual por meio da carta psicrométrica. A seguir na Figura 2, a imagem da carta psicrométrica demonstra essas correlações.

Figura 2. Ilustração da Carta Psicrométrica (Ribeiro, 2022)



2.3 Normas Regulamentadoras

2.3.1 Definição da NBR 7256

A qualidade do ar interior em ambientes hospitalares é de extrema importância para a saúde e o bem-estar dos pacientes, especialmente em unidades críticas como UTIs, onde o risco de infecções é alto. A NBR 7256 – Tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde (EAS) – Requisitos para projeto e execução de instalações – é a norma técnica brasileira que estabelece diretrizes para o projeto, a execução e a manutenção de sistemas de ar condicionado em estabelecimentos de saúde. A finalidade dessa norma é garantir a qualidade do ar interior, assegurando parâmetros de controle térmico, de umidade, renovação de ar e filtragem adequados para minimizar a proliferação de microrganismos patogênicos e substâncias nocivas, além de proporcionar conforto aos pacientes e profissionais de saúde (ABRAVA, 2022).

A NBR 7256 especifica os níveis de filtragem de ar, pressurização e controle de temperatura e umidade, conforme as particularidades de cada ambiente hospitalar. Para áreas críticas, como salas cirúrgicas e UTIs, a norma estabelece exigências rigorosas para a renovação do ar, com filtros de alta eficiência (HEPA), e a manutenção de pressões positivas ou negativas, dependendo do tipo de ambiente, para evitar a contaminação cruzada. Além disso, o controle preciso da umidade relativa, geralmente entre 40% e 60%, é essencial para inibir o crescimento de fungos e bactérias, e o controle de temperatura, normalmente mantida entre 20°C e 24°C, é fundamental para garantir o conforto térmico.

2.3.2 Aplicação da NBR 7256 em Unidades de Tratamento Intensivo para Queimados

As UTIs de queimados são ambientes altamente sensíveis, devido à vulnerabilidade dos pacientes que, além de terem sua barreira cutânea comprometida, apresentam maior suscetibilidade a infecções graves, como sepse. A aplicação da NBR 7256 em UTIs de queimados é de extrema relevância, uma vez que os pacientes requerem um ambiente com níveis de assepsia controlados para evitar infecções que possam comprometer o processo de cicatrização ou até resultar em complicações fatais.

Nesses ambientes, a norma recomenda o uso de sistemas de ar condicionado com alta taxa de renovação de ar e a utilização de filtros HEPA, que garantem a remoção de até 99,97% das partículas suspensas no ar, inclusive bactérias e esporos fúngicos. A pressurização positiva é necessária para impedir a entrada de agentes patogênicos de áreas adjacentes. Além disso, o controle rigoroso da umidade ajuda a prevenir a proliferação de micro-organismos, enquanto a temperatura deve ser regulada para proporcionar conforto tanto aos pacientes quanto aos profissionais, evitando variações bruscas que possam prejudicar a recuperação dos pacientes.

2.4 Equipamentos

2.4.1 Chiller de Condensação a Ar

O chiller de condensação a ar é um equipamento utilizado para o resfriamento de líquidos, por meio da transferência de calor entre o fluido refrigerante e o ar ambiente, sem a necessidade de água para o processo de condensação. Este sistema possui um condensador que opera com ventiladores que forçam a passagem do ar através de serpentinas, dissipando o calor retirado do fluido refrigerante (Fundamentals of HVAC Systems, 2006).

Figura 3. Ilustração de Chiller Condensação a Ar (Carrier do Brasil, 2020)



2.4.2 Unidade de Tratamento de Ar Externo

A Unidade de Tratamento de Ar Externo (UTAE) é um equipamento específico do sistema HVAC projetado para tratar exclusivamente o ar externo antes de sua distribuição no ambiente interno. Diferentemente dos sistemas tradicionais, que misturam o tratamento do ar externo com o ar de recirculação, a UTAE realiza o processamento do ar externo de forma independente, permitindo um controle preciso de suas condições, como temperatura, umidade e qualidade (Duarte Carlos, 2002).

Seu principal objetivo é assegurar que o ar externo, ao ser introduzido no ambiente, esteja tratado conforme os requisitos técnicos e normativos, contribuindo para a manutenção da qualidade do ar e o conforto térmico em espaços que exigem alto padrão de controle ambiental.

Ao tratar o ar externo separadamente, a UTAE oferece maior eficiência no controle de contaminantes e na adaptação às variações climáticas externas, fatores cruciais em aplicações sensíveis, como hospitais, laboratórios e ambientes industriais específicos. Essa capacidade de tratamento dedicado permite que a UTAE atenda às demandas de ambientes que exigem ar externo filtrado e climatizado com precisão, reduzindo a carga de trabalho dos demais componentes do sistema HVAC e garantindo uma renovação constante e segura do ar interno.

Figura 4. Ilustração de Unidade de Tratamento de Ar Externo (LG, 2022)



2.4.3 Unidade de Tratamento de Ar

Uma Unidade de Tratamento de Ar (UTA) é um equipamento essencial nos sistemas de climatização, responsável pelo controle e movimentação do ar em ambientes internos. Sua função

principal é realizar o tratamento do ar por meio de processos como ventilação, filtragem, aquecimento, resfriamento, umidificação ou desumidificação, a fim de manter a qualidade do ar de acordo com os parâmetros desejados (Duarte Carlos, 2002). Diferentemente de unidades que tratam exclusivamente o ar externo, a UTA também permite a recirculação do ar interno, misturando-o com o ar fresco que entra no sistema. Esse processo de recirculação contribui para o controle da carga térmica e a economia de energia, uma vez que uma parte do ar tratado é reutilizada, reduzindo a necessidade de condicionamento total do ar externo.

Figura 5. Ilustração de Unidade de Tratamento de Ar (Carrier do Brasil, 2021)



2.4.4 Trocador de Calor de Fluxo Cruzado

O Trocador de Calor de Fluxo Cruzado é um equipamento utilizado em sistemas de ventilação e climatização para promover a troca térmica entre duas correntes de ar que se cruzam em ângulo reto, sem misturá-las (Incropera e DeWitt, 2008). O equipamento é composto por uma matriz de placas, através dos quais o ar quente de um ambiente cede calor ao ar frio que entra, resultando em uma recuperação de energia térmica que melhora a eficiência do sistema. Esse tipo de recuperador é amplamente utilizado em processos industriais e edifícios, visando a economia de energia e o conforto térmico, além de reduzir a necessidade de aquecimento ou resfriamento adicionais.

Figura 6. Ilustração de Trocador de Calor de Fluxo Cruzado (COMSET, 2023)



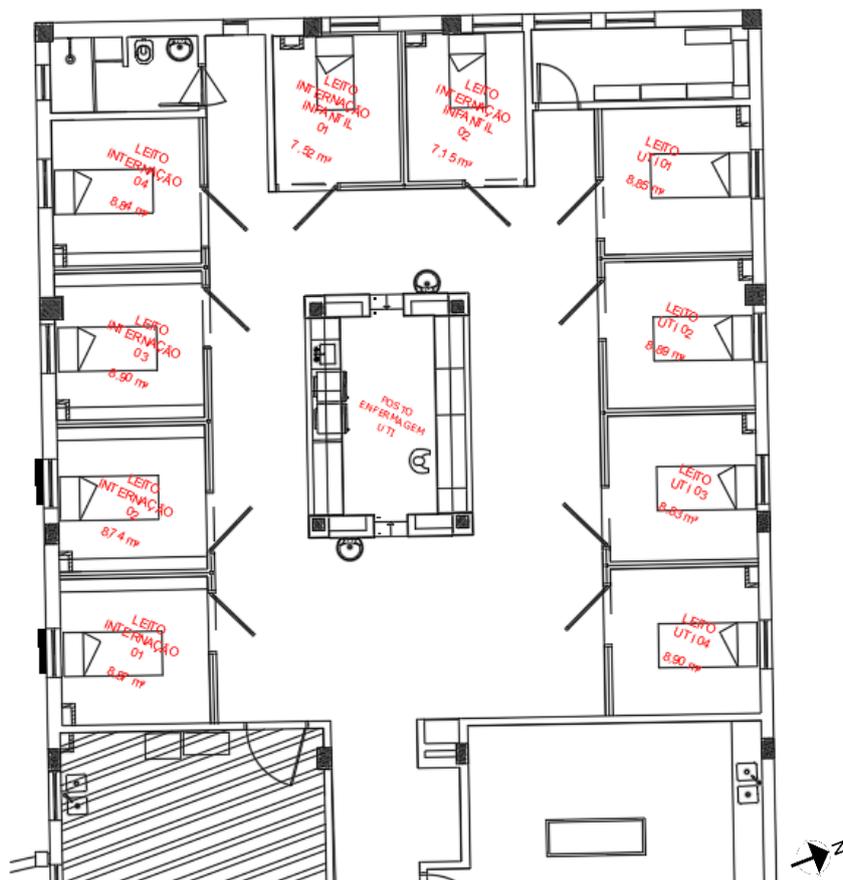
3. METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1. Avaliação de Ambientes

A etapa inicial da metodologia para o desenvolvimento do projeto de climatização hospitalar em uma Unidade de Terapia Intensiva (UTI) destinada a pacientes queimados consiste na análise

detalhada da planta baixa arquitetônica (conforme ilustrado na imagem da Figura 7), bem como na identificação e caracterização dos ambientes. Essa fase é essencial para compreender as particularidades de cada espaço, permitindo o levantamento das necessidades específicas de controle térmico e a avaliação da distribuição de calor.

Figura 7. Ilustração da UTI Queimados (Autoria própria, 2024)



Inicialmente, é realizado um levantamento detalhado da ocupação hospitalar, que envolve o tipo de tratamento realizado e as peculiaridades dos pacientes atendidos. Na UTI para queimados, por exemplo, é essencial considerar que os pacientes necessitam de ambientes altamente controlados em relação à temperatura e umidade para prevenir infecções e promover uma recuperação eficaz. No contexto deste projeto, a UTI possui 10 quartos, cada um com a capacidade de atender um único leito. Essa disposição de um leito por quarto permite um controle mais individualizado das condições de climatização, o que é ideal para as necessidades específicas dos pacientes queimados.

O número de leitos por quarto também é um fator crítico, pois influencia diretamente a carga térmica e o dimensionamento do sistema de climatização. Ambientes com maior número de leitos demandam um controle mais rigoroso para garantir conforto térmico homogêneo e evitar a formação de zonas de calor ou frio excessivo.

A área e volume dos ambientes é outro aspecto fundamental para o cálculo das cargas térmicas e o dimensionamento dos equipamentos de climatização. Salas maiores exigem um estudo mais detalhado da distribuição de ar e da escolha de pontos de insuflamento e retorno, de forma a otimizar a eficiência do sistema e garantir um ambiente controlado adequadamente.

A análise solar do local também é considerada, especialmente no que diz respeito à incidência de luz solar direta nas superfícies envidraçadas ou paredes externas. Essa análise permite determinar

a necessidade de medidas adicionais, como o uso de películas protetoras, cortinas ou a instalação de barreiras térmicas para minimizar a entrada de calor.

Por fim, é realizada a identificação de fontes internas de calor, como equipamentos hospitalares que dissipam calor, como monitores, bombas de infusão e outros dispositivos eletrônicos. Esses equipamentos podem influenciar diretamente o balanço térmico do ambiente e, portanto, devem ser considerados no cálculo das cargas térmicas e na definição da capacidade de resfriamento do sistema de climatização.

3.2. Análise Normativa

A segunda etapa da metodologia consiste na análise normativa, fundamental para garantir que o sistema de climatização projetado esteja em conformidade com as regulamentações vigentes para o tipo de ocupação hospitalar identificado. No caso específico de uma Unidade de Terapia Intensiva (UTI) para pacientes queimados, foi realizada uma revisão das normas e regulamentos aplicáveis, com especial ênfase na NBR 7256, que trata das condições de projeto e operação de sistemas de climatização para estabelecimentos assistenciais de saúde.

Com base na ocupação instalada, definida como "Quarto ou enfermaria para pacientes queimados expostos e UTQ - com ou sem antecâmara", a NBR 7256 foi utilizada para aferir as exigências normativas específicas para este tipo de ambiente. A norma fornece parâmetros essenciais que orientam o projeto de climatização, assegurando que o sistema atenda às necessidades de controle ambiental, qualidade do ar e conforto térmico exigidas para garantir a segurança e recuperação adequada dos pacientes.

Figura 8. Representação da Tabela de Parâmetros de Projeto da NBR 7256 (Adaptado de NBR 7256, 2024)

Ambientes	Tipo de ambiente (All, AA, AO, PE)	Nível de risco	Situação a controlar (AgB; AgQ; AgR; TE; EQ)	Nível de pressão	Vazão mínima de ar exterior [Renovações por hora]	Vazão mínima de ar insuflado [Número de movimentações por hora]	Exaustão total do ar ambiente	Classe de filtragem do ar insuflado	T °C	UR %
Quarto ou enfermaria para pacientes queimados expostos e UTQ - com ou sem antecâmara ^a	PE	3	AgB/TE	Positiva	6	6	Sim	G4 + F8 + ISO 35H	24-32	40-60

Entre os critérios estabelecidos pela norma, destaca-se a classificação do nível de risco do ambiente, que define a complexidade do sistema de climatização e a necessidade de maior controle sobre as condições ambientais. A partir desta classificação, foram determinadas as seguintes exigências:

Vazão mínima de ar exterior (renovações por hora): A norma estabelece o número mínimo de renovações de ar por hora para garantir a diluição de contaminantes e a manutenção da qualidade do ar interior, essencial para ambientes com alta demanda de controle sanitário, como UTIs para queimados.

Vazão mínima de ar insuflado (número de movimentações por hora): Este parâmetro determina a quantidade de ar que deve ser insuflada nos ambientes, considerando a movimentação necessária para garantir conforto térmico e condições seguras de recuperação. A norma orienta o número mínimo de movimentações de ar por hora, de modo a evitar zonas de estagnação e garantir uma distribuição eficiente do ar.

Necessidade de exaustão total do ambiente: Em UTIs para queimados, é imperativo que o ar do ambiente seja exaurido de forma adequada, evitando a recirculação de ar potencialmente

contaminado. Conforme a tabela da NBR 7256, não há recirculação de ar, uma vez que é necessário garantir uma exaustão de 100% do ar do ambiente. Portanto, a Unidade de Tratamento de Ar precisa operar com ar 100% externo, assegurando um ambiente limpo e seguro.

Classe de filtragem do ar insuflado: A norma especifica as classes de filtragem que devem ser aplicadas ao ar insuflado, de modo a remover partículas contaminantes e garantir um ambiente estéril e adequado à recuperação dos pacientes. Em UTIs, a filtragem é especialmente importante para controlar o risco de infecções.

Intervalo de temperatura máxima e mínima: A NBR 7256 define os limites de temperatura que devem ser mantidos no ambiente, assegurando que os pacientes queimados estejam em condições confortáveis, minimizando estresses térmicos que poderiam comprometer sua recuperação.

Intervalo de umidade relativa máxima e mínima: A umidade relativa também é controlada conforme os parâmetros da norma, pois níveis inadequados de umidade podem prejudicar tanto o conforto quanto o processo de cicatrização dos pacientes. A norma especifica os limites dentro dos quais a umidade relativa deve ser mantida.

3.3.Cálculo de Carga Térmica por Quarto

Neste projeto, foi levado em conta um ambiente com 10 quartos de Unidade de Terapia Intensiva, onde a carga térmica foi calculada individualmente para cada um desses ambientes. Para calcular a carga térmica requerida, escolheu-se examinar o quarto com as condições mais adversas, ou seja, aquele com a maior área (9,0m²) e orientação nordeste. Isso resulta em maior exposição solar e, conseqüentemente, um possível acréscimo na carga térmica.

O método utilizado para o cálculo foi o de balanço de energia, que considera a troca de calor entre o ambiente interno e o externo, levando em conta fatores como radiação solar, condução térmica pelas paredes e janelas, além de ganhos de calor internos. Para a elaboração deste cálculo, foi considerada uma temperatura externa de 35°C (ABNT NBR 16401, 2024), com base nas condições climáticas de verão de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul. A temperatura interna necessária, conforme estipulado pela norma aplicável (NBR 7256), foi definida em 24°C, visando garantir o conforto térmico ideal para os pacientes em recuperação.

Tabela 1. Representação dos Parâmetros de Entrada em amarelo no Cálculo de Carga Térmica (Autoria própria, 2024)

QUARTO - UTI QUEIMADOS							
Te = 35	Ti = 24						
Tbue = 25,1	URI = 50	k	m ²	dT	dTi	Q Kcal/h	Q (W)
ENVOLTÓRIA						1.475,76	1.716,00
PAREDE EXTERNA	leste	1,5		11		-	-
PAREDE EXTERNA	norte	1,5	6,3	11	8,34	182,76	212,52
PAREDE EXTERNA	oeste	1,5		11		-	-
PAREDE INTERNA		2	24	11		528,00	613,95
VIDRO EXTERNO	N	6	1,5	11	30	369,00	429,07
VIDRO EXTERNO	S	6		11		-	-
VIDRO EXTERNO	L	6		11		-	-
VIDRO EXTERNO	O	6		11		-	-
VIDRO INTERNO		6		11		-	-
PISO E/A		2	9	11		198,00	230,23
TETO E/A		2	9	11		198,00	230,23
FORRO		2,3		11		-	-
CARGAS INTERNAS						769,70	895,00
ILUMINAÇÃO			9	15	0,86	116,10	135,00
PESSOAS	QS		2	q/pess	75	129,00	150,00
PESSOAS	QL			q/pess	55	94,60	110,00
EQUIPAMENTO	QS		1		500	430,00	500,00
EQUIPAMENTO	QL						-
CARGA TOTAL						2.245,46	2.611,00
						0,74	TR

A partir da aplicação do método de balanço de energia com essas condições, o resultado obtido foi de 0,74 TR por quarto, equivalente a uma carga térmica de 8.880 BTU/h.

Tabela 2. Representação dos Resultados Resumidos do Cálculo de Carga Térmica (Autoria própria, 2024)

RESUMO CARGA TÉRMICA			
CARGA SENSÍVEL	QS	0,71	TR*
CARGA LATENTE	QL	0,03	TR
CARGA TOTAL	QT	0,74	TR
FATOR DE CALOR SENSÍVEL		0,96	

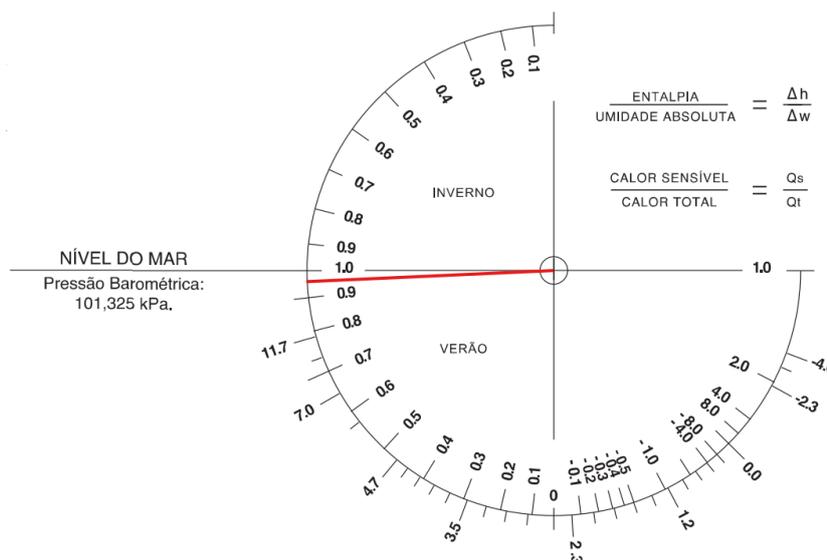
*TR: Toneladas de Refrigeração

3.4.Determinação de Temperatura de Insuflamento necessária

A determinação da temperatura de insuflamento é uma etapa essencial no dimensionamento do sistema de climatização para a UTI de queimados, pois influencia diretamente o conforto térmico e a eficiência energética do ambiente. Para este cálculo, utilizou-se o fator de calor sensível (FCS) gerado a partir do cálculo de carga térmica, cujo valor encontrado foi de 0,96 (Figura 11). Com este fator, é possível definir a temperatura de insuflamento adequada usando a carta psicrométrica, especificamente o diagrama psicrométrico circular.

O processo inicia-se com a seleção da condição de verão no diagrama psicrométrico circular. A partir do centro do círculo, traça-se uma linha reta em direção ao valor de Fator de Carga Sensível (FCS) correspondente a 0,96, como indicado pela linha vermelha no diagrama abaixo.

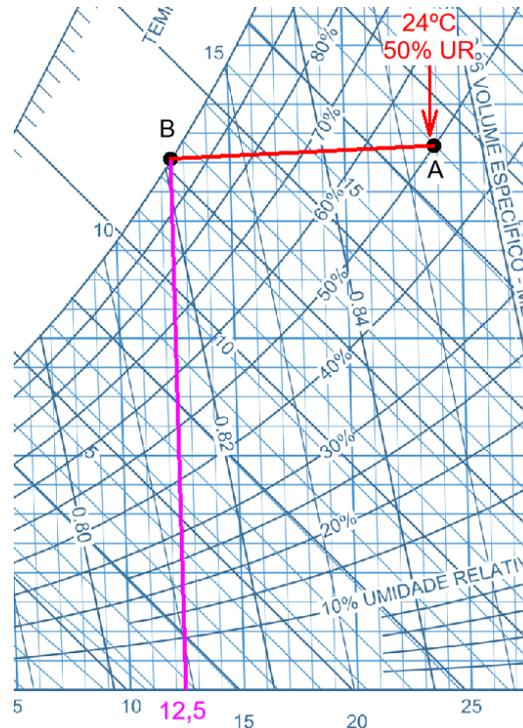
Figura 9. Ilustração diagrama psicrométrico circular (Adaptado de Ribeiro, 2022)



Com o auxílio de um transferidor, essa linha é projetada na carta psicrométrica com a mesma inclinação, partindo do ponto A, que representa a condição interna do quarto (24°C e 50% de umidade relativa), e terminando no ponto B, no lado esquerdo do diagrama (conforme imagem anexa). A partir do ponto B, obtém-se a leitura da temperatura de bulbo seco, que indica a temperatura de insuflamento

necessária. Após essa análise, a temperatura de insuflamento necessária foi determinada como 12,5°C conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10. Ilustração diagrama psicrométrico (Adaptado de Ribeiro, 2022)



3.5.Determinação da Vazão de Insuflamento necessária

A vazão de insuflamento necessária é calculada com base na carga térmica de calor sensível do ambiente, utilizando a equação da vazão de ar de insuflamento, que permite determinar a quantidade de ar que deve ser fornecida para equilibrar as cargas térmicas e atingir a temperatura desejada.

A equação da vazão de ar de insuflamento é dada por:

$$V = \frac{Q \cdot FCS}{\rho \cdot cp \cdot (Ti - Ts)} \quad (1)$$

Onde:

- V é a vazão de ar de insuflamento em m^3/s ;
- Q é a carga térmica total do ambiente em kW;
- FCS é o fator de calor sensível do ambiente;
- ρ é a densidade do ar em kg/m^3 , que em condições normais de temperatura e pressão é aproximadamente $1,2 kg/m^3$;
- cp é o calor específico do ar em $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$, com um valor típico de $1,005 kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;
- Ts é a temperatura de insuflamento, previamente determinada como $12,5^\circ C$;
- Ti é a temperatura interna do ambiente, especificada como $24^\circ C$ para atender às normas de conforto térmico hospitalar.

Essa equação considera que a vazão de ar deve ser suficiente para compensar a carga térmica do ambiente, levando em conta a diferença entre a temperatura de insuflamento e a temperatura interna,

além das propriedades do ar. Utilizando os valores de carga térmica já obtidos e a temperatura de insuflamento determinada, calcula-se a vazão de ar necessária para manter as condições internas especificadas.

Substituindo os valores na Equação (1), tem-se:

$$V = \frac{2,611 \cdot 0,96}{1,2 \cdot 1,005 \cdot (24 - 12,5)} \quad (2)$$

A partir dessa equação, obteve-se um resultado de 0,181 m³/s, ou aproximadamente 652 m³/h, para a vazão de insuflamento.

3.6.Determinação da Vazão de Ar Externo

Em conformidade com a NBR 7256, que regula os sistemas de ventilação e condicionamento de ar para estabelecimentos assistenciais de saúde, é exigido que o ar seja exaurido a 100% do ambiente, o que impede o uso de sistemas com retorno de ar. Isso significa que o ar insuflado no ambiente não pode ser recirculado pelo sistema de climatização, eliminando a possibilidade de retorno do ar ao equipamento.

Com a impossibilidade de retorno, torna-se necessário que toda a vazão de insuflamento já determinada seja composta exclusivamente por ar externo. No caso deste projeto, a vazão de insuflamento foi previamente calculada em 652 m³/h para atender à carga térmica e às condições internas desejadas de temperatura e umidade. Assim, essa vazão de 652 m³/h será inteiramente composta de ar externo.

3.7.Determinação da Carga Térmica Total considerando sistema 100% ar externo

Dado que a vazão de ar nos equipamentos será composta por 100% de ar externo, é necessário recalculá-la a carga térmica do quarto, considerando que todo o ar de insuflamento provém diretamente do ambiente externo. Esse cálculo é fundamental para assegurar que o sistema de climatização atenda adequadamente às condições térmicas e de qualidade do ar exigidas em um ambiente hospitalar crítico, como uma UTI de queimados. Para a realização deste cálculo, utilizou-se a carta psicrométrica novamente.

No diagrama psicrométrico abaixo (Figura 11), foi definido o ponto A para representar as condições do ar externo de Porto Alegre-RS (NBR 16401), com uma temperatura de bulbo seco de 35°C e umidade relativa de 60%. O ponto B foi estabelecido para a condição de insuflamento previamente calculada, com temperatura de 12,5°C e umidade relativa de 100%. Após a demarcação desses pontos na carta psicrométrica, foram aferidas as entalpias correspondentes, sendo 90,2 kJ/kg para o ponto A e 35,4 kJ/kg para o ponto B.

Figura 11. Ilustração diagrama psicrométrico pontos A e B (Adaptado de Ribeiro, 2022)



Com a variação de entalpia (Δh) obtida entre esses pontos, é possível determinar a carga térmica total necessária para a climatização do quarto de UTI utilizando a equação de transferência de calor para fluxo de fluido, que é expressa pela Equação (3):

$$Q_{ac} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (3)$$

Onde:

Q_{ac} é a carga térmica total em kW da serpentina da UTA;

\dot{m} é a vazão mássica de ar (em kg/s), calculada pela multiplicação da densidade do ar ρ pela vazão volumétrica de ar V ;

Δh é a variação de entalpia do ar entre o estado externo e o estado de insuflamento, medida em kJ/kg.

Neste caso, a densidade do ar (ρ) foi considerada como 1,2 kg/m³, a vazão volumétrica de ar (V) como 0,188 m³/s, e a variação de entalpia (Δh) como a diferença entre 90,2 kJ/kg e 35,4 kJ/kg, resultando em 54,8 kJ/kg. A vazão mássica (\dot{m}) é então calculada pela Equação (4):

$$\dot{m} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,181 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,2172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4)$$

Substituindo esses valores na Equação (4), tem-se:

$$Q_{ac} = 0,2172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 54,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 11,9 \text{ kW} \quad (5)$$

Portanto, a carga térmica total necessária para climatizar o quarto de UTI, considerando o uso de 100% de ar externo, é de aproximadamente 11,9 kW, o que equivale a cerca de 3,39 TR (Toneladas de Refrigeração) para climatizar um ambiente de 9m².

3.8. Resultados da Utilização de Sistema sem Recuperação de Calor

A análise dos resultados da utilização de um sistema de climatização sem recuperação de calor revela uma carga térmica elevada, resultando em uma demanda significativa de energia e impacto financeiro para o projeto. Com a necessidade de atender aos requisitos de exaustão total estabelecidos pela NBR 7256, foi projetado um sistema de insuflamento composto 100% por ar externo. Essa condição, embora essencial para manter a qualidade do ar em uma UTI de queimados, implica um aumento expressivo na carga térmica.

Para cada quarto com área de 9 m², a carga térmica foi calculada em 3,39 TR, valor consideravelmente alto para um ambiente com essas dimensões. Esse resultado reflete a energia necessária para tratar o ar externo até atingir as condições internas de conforto. No contexto do projeto, que envolve um total de 10 quartos, a carga térmica totaliza 33,9 TR, exigindo uma central térmica robusta e com alta capacidade de refrigeração. Essa demanda acarreta um significativo aumento no consumo de energia, impactando diretamente a eficiência operacional e a sustentabilidade do projeto.

Além do consumo energético, a necessidade de operar com 100% de ar externo também requer equipamentos de climatização mais robustos. Cada unidade de tratamento de ar precisa ser dimensionada para suportar a carga térmica elevada, o que resulta em equipamentos maiores e mais potentes. Esse dimensionamento aumenta tanto o custo de aquisição quanto o footprint (área ocupada) dos equipamentos, o que é um desafio em ambientes hospitalares com espaço físico restrito. O aumento no tamanho e na complexidade dos sistemas de climatização gera também custos adicionais de instalação e manutenção, além de possíveis dificuldades logísticas e estruturais para a acomodação dos equipamentos.

Em suma, a utilização de um sistema sem recuperação de calor em uma UTI de queimados implica uma carga térmica elevada e uma demanda energética considerável. O projeto exige uma central térmica com capacidade de 33,9 TR para atender os 10 quartos de UTI, o que representa um custo elevado em termos de energia e infraestrutura. A necessidade de equipamentos mais robustos aumenta os custos de investimento inicial e a área ocupada, impactando o layout e o orçamento do projeto.

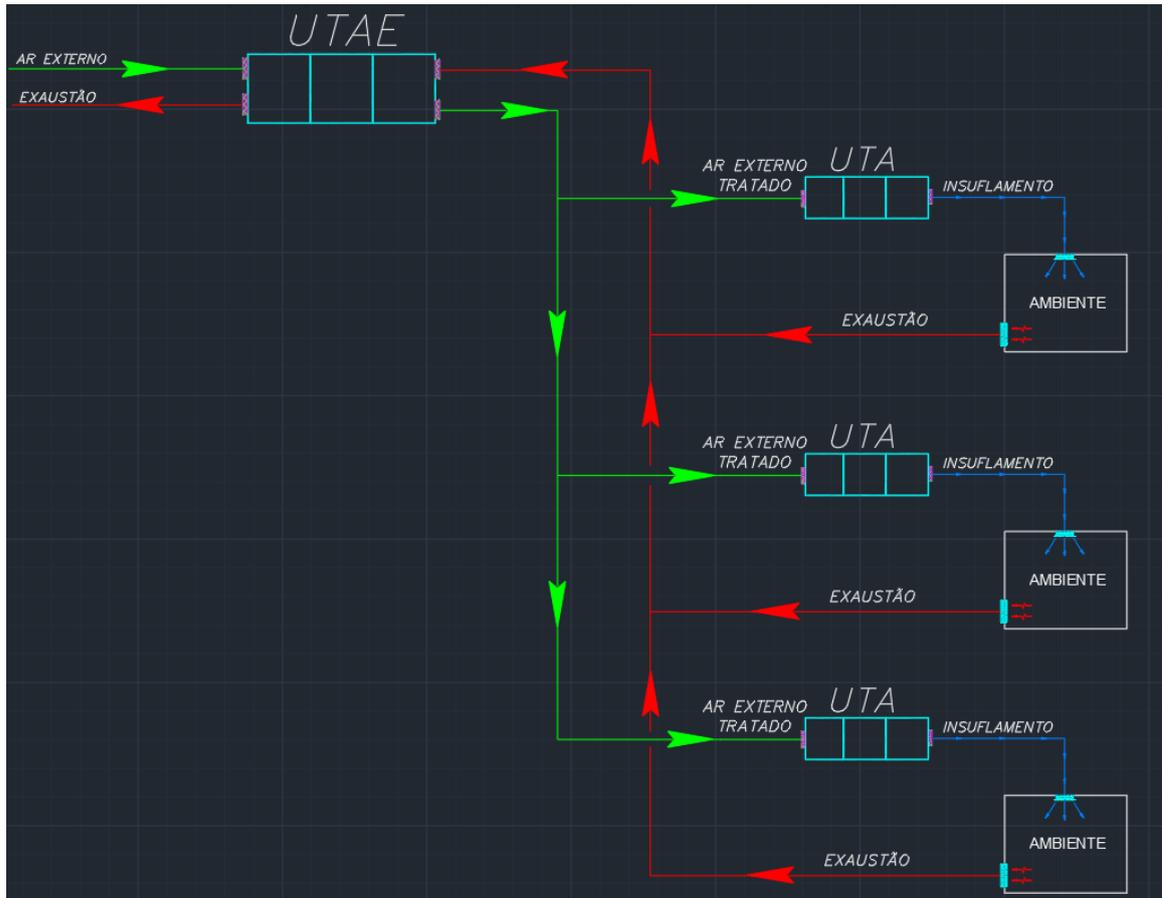
3.9. Aplicação de Sistema com Recuperação de Calor

3.9.1 Conceito Proposto

Devido à elevada demanda energética identificada no projeto de climatização para a UTI de queimados, foi considerada a implementação de um sistema com recuperação de calor, com o objetivo de reduzir o consumo de energia e melhorar a eficiência operacional. Esse sistema de recuperação de calor foi projetado para operar por meio de uma Unidade de Tratamento de Ar Externo (UTAE), interligada em série com as Unidades de Tratamento de Ar (UTAs) que atendem individualmente cada quarto da UTI. A estratégia adotada visa o reaproveitamento do calor do ar exaurido, aproveitando a energia térmica do ar que seria descartado para pré-condicionar o ar externo, reduzindo assim a carga térmica sobre os equipamentos de climatização.

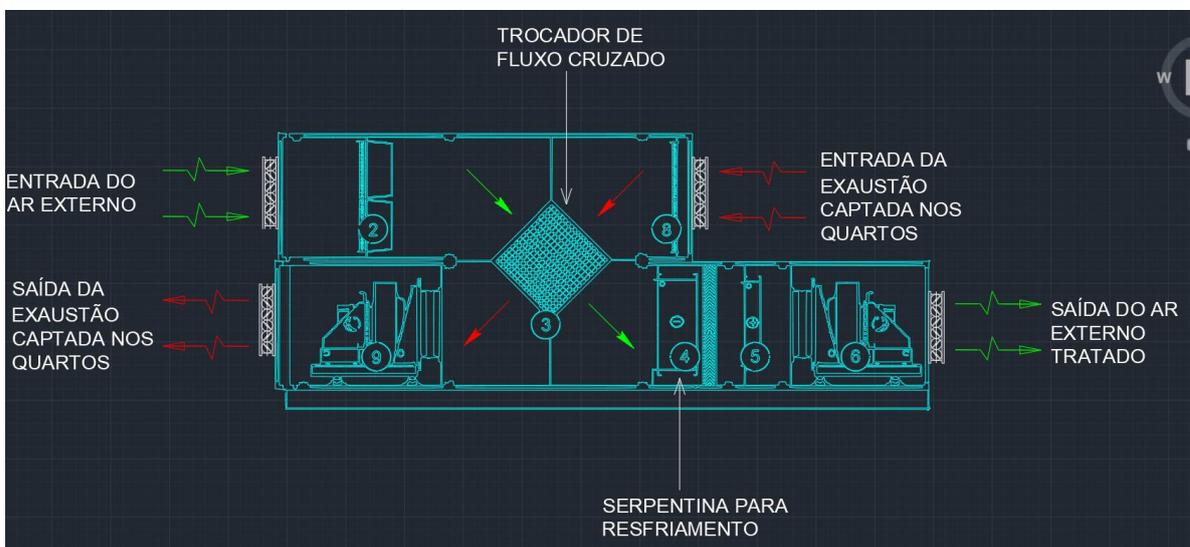
O sistema proposto conforme representado pela Figura 12 consiste em redirecionar o ar exaurido dos quartos climatizados para a UTAE, onde ocorre a troca de calor entre esse ar exaurido climatizado e o ar externo captado.

Figura 12. Representação do fluxograma de ar do sistema proposto (Autoria própria, 2024)



Para viabilizar essa transferência de calor sem contato direto entre os fluxos de ar, foi selecionado um trocador de calor de fluxo cruzado, garantindo que o ar exaurido e o ar externo não se misturem, conforme exigido pelas normas. Além disso, após o trocador de fluxo cruzado, foi prevista uma serpentina de água gelada na UTAE, com o objetivo de resfriar o ar externo pré-condicionado até as condições de insuflamento desejadas.

Figura 13. Representação da UTAE no sistema proposto (Autoria própria, 2024)



A aplicação de uma UTAE com sistema de recuperação de calor acoplado às UTAs e a serpentina de água gelada oferece benefícios significativos. Ao pré-resfriar o ar externo utilizando o calor do ar exaurido, seguido pelo ajuste final de temperatura através da serpentina, o sistema reduz a carga térmica que as UTAs precisam processar para alcançar as condições internas desejadas dos quartos. Como resultado, é possível diminuir a capacidade total de refrigeração necessária no projeto, o que implica em menor demanda energética e uma operação mais sustentável.

3.9.2 Dimensionamento da Unidade de Tratamento de Ar Externo

3.9.2.1 Vazão de Ar

Para o dimensionamento da vazão de ar da Unidade de Tratamento de Ar Externo (UTAE), foi considerada a soma das vazões de insuflamento de todos os quartos da UTI. Cada quarto requer uma vazão de insuflamento de 652 m³/h para atender às condições térmicas e de qualidade do ar estabelecidas pelo projeto. Assim, para os 10 quartos projetados, a vazão total de ar necessária é dada pela Equação (6):

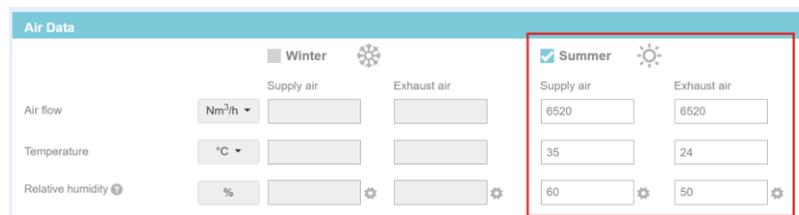
$$\text{Vazão Total} = 652 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 10 = 6520 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (6)$$

3.9.2.2 Condições de Entrada e Saída do Trocador de Calor de Fluxo Cruzado da UTAE

Para determinar as condições de entrada e saída do ar no trocador de calor de fluxo cruzado, foi utilizado o software HeatexSelect, desenvolvido pela empresa Heatex. Esse software permite simular as trocas térmicas e determinar as condições de ar após a passagem pelo trocador de calor de fluxo cruzado, com base em parâmetros específicos de entrada.

Para a configuração do sistema, foram inseridas as seguintes condições de entrada conforme Figura 14:

Figura 14. Representação dos parâmetros de entrada no Trocador de Fluxo Cruzado (Adaptado de Heatex, 2024)



Parameter	Supply air	Exhaust air
Air flow (Nm ³ /h)	6520	6520
Temperature (°C)	35	24
Relative humidity (%)	60	50

- Condição de entrada de ar externo (NBR 16401): Temperatura de 35°C, Umidade relativa de 60% e Vazão de 6520 m³/h.
- Condição de entrada do ar de exaustão captado nos quartos: Temperatura de 24°C, Umidade relativa de 50% e Vazão de 6520 m³/h.

Com base nesses dados, o software forneceu as seguintes condições de saída indicados na Figura 15:

Figura 15. Representação dos parâmetros de saída no Trocador de Fluxo Cruzado (Adaptado de Heatex, 2024)

State after	Temperature	26.1°C	32.9°C
°C ▼	Temp.wet bulb	26.1°C	19.9°C
	Relative humidity	99.8%	29.8%
	Absolute humidity	21.41 g/kg ⁶	9.29 g/kg ⁶

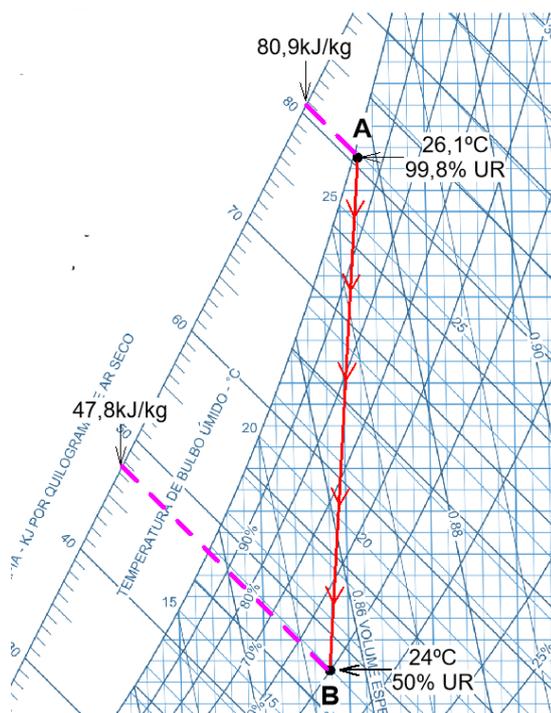
- Condições de saída do ar externo após o trocador de fluxo cruzado: temperatura de 26,1°C e umidade relativa de 99,8%.
- Condições de saída do ar de exaustão após o trocador de fluxo cruzado: temperatura de 32,9°C e umidade relativa de 29,8%.

Esses resultados indicam que o trocador de calor de fluxo cruzado conseguiu reduzir significativamente a temperatura do ar externo antes de sua entrada no sistema de climatização, aproximando-o da condição desejada para insuflamento e, assim, diminuindo a carga térmica sobre o equipamento de climatização.

3.9.2.3 Condições de Entrada e Saída da Serpentina da UTAE

Dentro da Unidade de Tratamento de Ar Externo (UTAE), foi prevista a instalação de uma serpentina de água gelada logo após o trocador de calor de fluxo cruzado. O objetivo dessa serpentina é resfriar o ar vindo do trocador até que ele atinja as condições de insuflamento de 24°C com 50% de umidade relativa (UR). Para dimensionar a capacidade de resfriamento necessária para a serpentina, utilizou-se a carta psicrométrica conforme Figura 16, estabelecendo dois pontos de referência: o ponto A, que representa a saída do trocador de fluxo cruzado com 26,1°C e 99,8% de UR, e o ponto B, que representa a condição desejada de saída da serpentina, de 24°C a 50% UR.

Figura 16. Representação dos pontos A e B no diagrama psicrométrico (Adaptado de Ribeiro, 2022)



Ao analisar esses pontos na carta psicrométrica, obtivemos as entalpias correspondentes para o cálculo da capacidade térmica da serpentina:

- Entalpia do ponto A (saída do trocador de fluxo cruzado): 80,9 kJ/kg
- Entalpia do ponto B (saída de ar da serpentina): 47,8 kJ/kg

A vazão de ar foi considerada em 6520 m³/h, ou 1,81 m³/s. Utilizando a equação de transferência de calor para fluxo de fluido, a capacidade térmica da serpentina pode ser determinada pela Equação (7):

$$Q_{ac} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (7)$$

Onde:

- Q_{ac} é a carga térmica total em kW da serpentina da UTAE;
- \dot{m} é a vazão mássica de ar (em kg/s), que pode ser calculada multiplicando a densidade do ar (ρ) pela vazão volumétrica (V);
- Δh é a variação de entalpia entre os pontos A e B, ou seja, a diferença entre 80,9 kJ/kg e 47,8 kJ/kg.

Para este cálculo, considera-se a densidade do ar (ρ) como aproximadamente 1,2 kg/m³. Assim a vazão mássica pode ser calculada conforme representado pela Equação (8) abaixo:

$$\dot{m} = \rho \cdot V = 1,2 \frac{kg}{m^3} \times 1,81 \frac{m^3}{s} = 2,172 \frac{kg}{s} \quad (8)$$

Com a variação de entalpia (Δh) sendo:

$$\Delta h = 80,9 \frac{kJ}{kg} - 47,8 \frac{kJ}{kg} = 33,1 \frac{kJ}{kg} \quad (9)$$

Finalmente, a capacidade térmica necessária para a serpentina é dada pela Equação (10):

$$Q_{ac} = 2,172 \frac{kg}{s} \times 33,1 \frac{kJ}{kg} = 71,9 kW \quad (10)$$

Portanto, a serpentina de água gelada deve ter uma capacidade de resfriamento de aproximadamente 71,9 kW para reduzir a temperatura do ar de 26,2°C e 99% UR até a condição de insuflamento desejada de 24°C e 50% UR. Esse valor, quando convertido para toneladas de refrigeração (TR), pode ser obtido dividindo-se a potência em kW pelo fator de conversão de 3,517 kW por TR conforme indicado pela Equação (11):

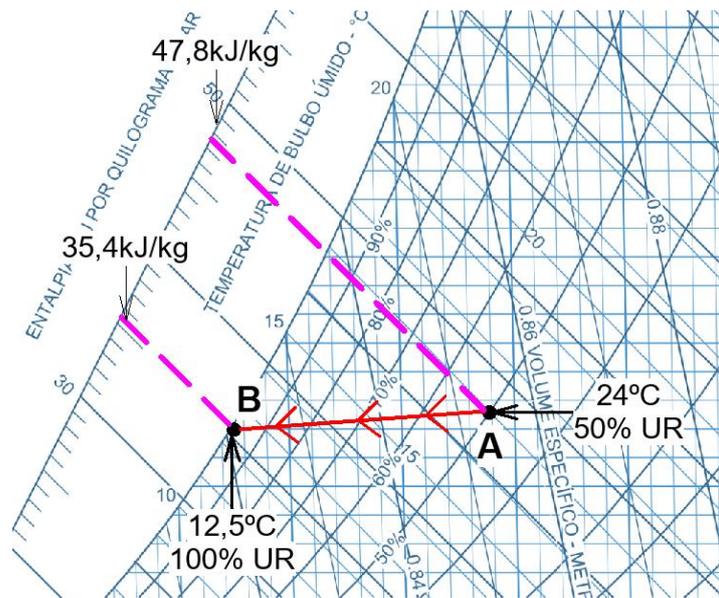
$$Capacidade \ em \ TR = \frac{71,9}{3,517} \approx 20,5 TR \quad (11)$$

Assim, a serpentina de água gelada deve ter uma capacidade de aproximadamente 20,5 TR.

3.10. Dimensionamento das Unidades de Tratamento de Ar

Para o novo dimensionamento das Unidades de Tratamento de Ar (UTAs) de cada quarto de UTI, é necessário utilizar a carta psicrométrica para estabelecer os pontos de referência do processo de resfriamento. Conforme Figura 17, o ponto A representa o ar tratado proveniente da UTAE, com condições de 24°C e 50% de umidade relativa (UR), enquanto o ponto B representa o ar climatizado na temperatura de insuflamento já calculada, de 12,5°C com 100% UR. Esses pontos permitem calcular a capacidade da serpentina da UTA de cada quarto pela variação de entalpia entre o ar de entrada e o ar de insuflamento.

Figura 17. Representação dos pontos A e B no diagrama psicrométrico (Adaptado de Ribeiro, 2022)



Na carta psicrométrica, foram obtidas as seguintes entalpias:

- Entalpia do ponto A (ar vindo da UTAE): 47,8 kJ/kg
- Entalpia do ponto B (ar insuflado na condição de 12,5°C a 100% UR): 35,4 kJ/kg

A vazão de ar para cada quarto foi estabelecida em 652 m³/h, ou 0,181 m³/s. Com esses valores, a capacidade da serpentina é determinada utilizando a Equação (12) de transferência de calor para fluxo de fluido:

$$Q_{ac} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (12)$$

Onde:

Q_{ac} é a capacidade de resfriamento necessária da serpentina em kW,

\dot{m} é a vazão mássica de ar (em kg/s), calculada pela multiplicação da densidade do ar (ρ) pela vazão volumétrica (V'),

Δh é a variação de entalpia entre os pontos A e B.

Considerando a densidade do ar (ρ) como 1,2 kg/m³, a vazão mássica é representada pela Equação (13):

$$\dot{m} = \rho \cdot V' = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,181 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,2172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (13)$$

A variação de entalpia (Δh) entre os pontos A e B é retratada pela Equação (14) abaixo:

$$\Delta h = 47,8 \frac{kJ}{kg} - 35,4 \frac{kJ}{kg} = 12,4 \frac{kJ}{kg} \quad (14)$$

Substituindo os valores na Equação (12) de transferência de calor, tem-se:

$$Q_{ac} = 0,2172 \frac{kg}{s} \times 12,4 \frac{kJ}{kg} = 2,7 kW \quad (15)$$

Portanto, a capacidade de resfriamento necessária para a serpentina de cada UTA é de aproximadamente 2,7 kW. Esse dimensionamento é fundamental para assegurar que o ar insuflado atenda às condições ideais de temperatura e umidade para o ambiente de UTI, garantindo conforto e segurança para os pacientes.

A seguir é representado pela Equação (16) a conversão de 2,7 kW para toneladas de refrigeração (TR):

$$Capacidade \ em \ TR = \frac{2,8}{3,517} \approx 0,77 TR \quad (16)$$

Portanto, a nova capacidade de resfriamento necessária para a serpentina de cada UTA é de aproximadamente 0,77 TR.

3.11. Resultados da Utilização de Sistema com Recuperação de Calor

No estudo do sistema de climatização para Unidades de Terapia Intensiva (UTIs), foi avaliada a utilização de uma Unidade de Tratamento de Ar Externo (UTAE) integrada a um sistema de recuperação de calor com trocador de fluxo cruzado. A UTAE foi projetada para realizar o pré-condicionamento do ar externo, visando à redução da carga térmica nas Unidades de Tratamento de Ar (UTAs) responsáveis pela climatização de cada quarto de UTI.

Com a inclusão do sistema de recuperação de calor, verificou-se uma carga térmica total de 20,5 TR atribuída ao tratamento do ar externo realizado pela UTAE. Adicionalmente, cada UTA destinada à climatização dos quartos individuais apresentou uma carga térmica de 0,77 TR. Considerando a existência de 10 quartos de UTI no ambiente em estudo, a carga térmica total é calculada da seguinte forma:

$$Carga \ Total = 20,5 TR + (0,77 TR \times 10) = 20,5 TR + 7,7 TR = 28,2 TR \quad (17)$$

Portanto, para atender à demanda térmica de 28,2 TR, torna-se necessária a instalação de uma central térmica com capacidade nominal de 30 TR. Essa capacidade adicional garante que a central possa atender plenamente às condições operacionais exigidas, oferecendo ainda uma pequena margem de segurança para variações de carga ou exigências operacionais imprevistas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Análise Comparativa

A análise comparativa dos dois cenários estudados para a climatização de uma Unidade de Terapia Intensiva (UTI) de queimados revelou implicações significativas em termos de eficiência energética, capacidade física instalada e impactos financeiros.

Cenário 1: Sistema sem Recuperação de Calor

O sistema projetado com insuflamento de 100% de ar externo, sem recuperação de calor, resultou em uma carga térmica total de 33,9 TR para atender aos 10 quartos da UTI. Cada quarto, com uma área de 9 m², apresentou uma carga individual de 3,39 TR, valor elevado para as dimensões do ambiente. Essa condição decorre da energia necessária para tratar integralmente o ar externo até as condições internas de conforto exigidas pela NBR 7256.

As principais consequências deste cenário englobam:

Consumo energético elevado: A falta de recuperação de calor requer mais capacidade da central térmica, prejudicando a eficácia operacional e a sustentabilidade do projeto.

Equipamentos menos compactos: O sistema requer unidades de tratamento de ar (UTAs) de maior capacidade e potência, o que eleva os gastos com compra, instalação e manutenção.

Limitações físicas e estruturais: O footprint significativo dos equipamentos representa um obstáculo em instalações hospitalares com restrições de espaço, além de exigir reforços estruturais no prédio.

Em resumo, embora tecnicamente viável, o sistema sem recuperação de calor resulta em um aumento expressivo de custos de capital, consumo energético e ocupação de espaço físico.

Cenário 2: Sistema com Recuperação de Calor

A inclusão de uma Unidade de Tratamento de Ar Externo (UTAE) equipada com um trocador de fluxo cruzado para recuperação de calor mostrou-se uma solução mais eficiente, reduzindo significativamente a carga térmica total para 28,2 TR, considerando os 10 quartos da UTI. Cada quarto apresentou uma carga individual de 0,77 TR, enquanto a UTAE foi responsável pelo tratamento inicial de 21,2 TR.

As vantagens deste cenário incluem:

Redução da demanda energética: A recuperação de calor diminui a carga térmica necessária, reduzindo o consumo de energia e os custos operacionais do sistema.

Equipamentos mais compactos: O pré-condicionamento do ar externo pela UTAE reduz a carga sobre as UTAs individuais, permitindo o uso de equipamentos menos robustos devido a redução do tamanho da serpentina de resfriamento.

Viabilidade física e estrutural: Com menores dimensões e menor footprint nos equipamentos, o sistema demanda menos espaço físico e reforços estruturais, adequando-se melhor a edificações hospitalares antigas como o caso do Hospital de Pronto Socorro de Porto Alegre.

Esse cenário, apesar de envolver um maior investimento inicial devido à instalação da UTAE, apresenta vantagens significativas em termos de eficiência energética e redução de custos operacionais no longo prazo.

Em suma, conforme ilustrado pela Tabela 3 abaixo, o estudo demonstra que o sistema com recuperação de calor é a alternativa mais eficiente e sustentável para a climatização das UTIs de queimados. Com sua implementação, foi possível reduzir a carga térmica em 5,7 Toneladas de Refrigeração (Redução de 16,81%). Essa redução, considerando que o sistema de climatização do hospital operará continuamente 24 horas por dia, 7 dias por semana, resultará em uma significativa economia anual de energia.

Tabela 3. Representação resumida dos resultados (Autoria própria, 2024)

TABELA COMPARATIVA	
SISTEMA UTILIZADO	CAPACIDADE TOTAL NECESSÁRIA
SEM RECUPERAÇÃO DE CALOR	33,9 TR
COM RECUPERAÇÃO DE CALOR	28,2 TR
REDUÇÃO DE	5,7 TR

4.2 Análise de Economia de Energia e Payback

No primeiro cenário analisado, sistema sem recuperação de energia, considerou-se a instalação de 10 Unidades de Tratamento de Ar (UTAs), cada uma com capacidade de 3,39 TR.

Cada unidade possui um custo de aquisição de R\$ 39.200,00, resultando em um investimento total de R\$ 392.000,00 para as 10 unidades conforme representado pela Tabela 4.

Tabela 4. Representação de custos de aquisição de equipamentos para o Sistema sem Recuperação de Energia (Autoria própria, 2024)

SISTEMA SEM RECUPERAÇÃO DE CALOR			
Equipamento	Custo de Aquisição	Quantidade	Valor Total
UTAS-3,39 TR	R\$ 39.200,00	10	R\$ 392.000,00
			TOTAL
			R\$ 392.000,00

No segundo cenário, foi analisada a implementação de um sistema de climatização com recuperação de energia. Este sistema é composto por 10 Unidades de Tratamento de Ar (UTAs) internas, cada uma com capacidade de 0,77 TR, além de uma Unidade de Tratamento de Ar Externo (UTA).

O custo unitário de cada UTA interna foi orçado em R\$ 30.800,00, resultando em um investimento total de R\$ 308.000,00 para as 10 unidades. Adicionalmente, a aquisição da UTAE foi orçada em R\$ 120.000,00. Dessa forma, conforme representado pela Tabela 5, o custo total de aquisição dos equipamentos para este cenário é de R\$ 428.000,00.

Tabela 5. Representação de custos de aquisição de equipamentos para o Sistema com Recuperação de Energia (Autoria própria, 2024)

SISTEMA COM RECUPERAÇÃO DE CALOR			
Equipamento	Custo de Aquisição	Quantidade	Valor Total
UTAS-0,77 TR	R\$ 30.800,00	10	R\$ 308.000,00
UTAE-20,5 TR	R\$ 120.000,00	1	R\$ 120.000,00
			TOTAL
			R\$ 428.000,00

Com base nos dois cenários apresentados, foi realizada uma análise detalhada da economia de energia anual considerando a redução da capacidade total instalada proporcionada pelo sistema com

recuperação de energia. Este sistema apresentou uma economia de 5,7 TR em relação ao sistema sem recuperação de energia, resultando em um consumo energético significativamente menor.

Para a análise, considerou-se o consumo médio de 1,14 kW por TR, um valor típico para Chillers de Condensação a Ar. Com base nessa premissa, o sistema foi dimensionado para operar 24 horas por dia, 7 dias por semana, durante 272 dias por ano (descontando o período correspondente ao inverno, quando o sistema não é necessário).

O cálculo da economia de energia foi realizado considerando o preço médio do kW nos horários de pico e fora de pico. Conforme representado pela Tabela 6, a economia total estimada foi de R\$ 18.028,05 por ano, evidenciando o impacto positivo da redução da capacidade instalada e da eficiência proporcionada pelo sistema com recuperação de energia.

Tabela 6. Representação dos fatores considerados para a estimativa de economia de energia anual e seu respectivo resultado (Autoria própria, 2024)

ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA ANUAL	
TR economizado	5,7
Consumo elétrico médio kW / TR	1,14
kW por dia Horário de Pico	19,494
kW por dia Horário Fora de Pico	136,458
Dias contabilizados	272
Preço do kW Hospitalar Pico	R\$ 0,60
Preço do kW Hospitalar Fora de Pico	R\$ 0,40
Custo Anual Horário de Pico	R\$ 3.181,42
Custo Anual Horário Fora de Pico	R\$ 14.846,63
Economia Total Anual	R\$ 18.028,05

Assim, é possível concluir que o retorno financeiro para compensar a diferença de custo de aquisição entre o sistema com recuperação de energia e o sistema sem recuperação de energia pode ser alcançado em 2 anos ou 24 meses. A diferença de investimento inicial entre os dois sistemas é de R\$ 36.000,00, enquanto a economia anual proporcionada pelo sistema com recuperação de energia é de R\$ 18.028,05.

Esses resultados demonstram que a adoção do sistema com recuperação de energia não apenas oferece benefícios técnicos, como maior eficiência energética e redução do consumo, mas também se mostra economicamente viável no curto prazo. Além disso, a economia acumulada ao longo dos anos subsequentes reforça a atratividade desse investimento para aplicações que demandam climatização contínua, como unidades de terapia intensiva hospitalar.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor e engenheiro Bruno De Rosso Ribeiro, ao engenheiro Flávio Teixeira, ao engenheiro Felipe Andrighetti e à advogada Larissa Mazzucco pelo apoio e contribuição indispensáveis para a realização deste trabalho.



6. REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 16401: Instalações de ar-condicionado — Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projeto; Parte 2: Parâmetros de conforto térmico; Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024
- ABNT. NBR 7256: Tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde — Requisitos para projeto e execução. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.
- ABRAVA. Manual de Aplicação para Sistemas de Climatização e Refrigeração. São Paulo: Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, 2022
- ASHRAE. ASHRAE Handbook—Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- CREDER, H. Instalações de Ar Condicionado. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2003
- DUARTE, J. C. Sistemas de Ar Condicionado e Ventilação: Projeto e Aplicações. 1ª edição. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2002.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- RIBEIRO, B. de R. Psicrometria Aplicada à Climatização e Refrigeração. São Miguel: Editora São Miguel, 2022
- SIMÕES-MOREIRA, J. R.; HERNANDEZ NETO, A. Fundamentos e Aplicações da Psicrometria. 2ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 2019