

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO POR
SEQUENCIAMENTO DE *CHILLERS* EM SÉRIE**

Vinicius Mariano Figueiredo

São Paulo

2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO POR
SEQUENCIAMENTO DE *CHILLERS* EM SÉRIE**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de graduação em Engenharia.

Vinicius Mariano Figueiredo

Orientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo

2017

Catalogação-na-publicação

Figueiredo, Vinicius Mariano

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO POR
SEQUENCIAMENTO DE CHILLERS EM SÉRIE / V. M. Figueiredo -- São
Paulo, 2017.

46 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Ar condicionado 2.Chiller 3.Configuração 4.Eficiência I.Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

A redução no consumo de energia, tanto para diminuição de custos quanto para a sustentabilidade, pode ser alcançada por meio da otimização energética de sistemas de ar condicionado central, responsáveis por uma grande parcela do consumo. Esse problema pode ser resolvido com o estudo de novas configurações para plantas de refrigeração, utilizando sistemas de múltiplos *chillers*, arranjados em série. Esse projeto pretende analisar as características de edificações comerciais, onde esses sistemas são empregados, levantando o perfil de demanda de resfriamento dessas com a ferramenta de simulação EnergyPlus. Com esses dados analisados, foram modeladas novas configurações e em seguida simuladas, a fim de obter os novos coeficientes de desempenho do sistema. Após o processo, observou-se que o arranjo em série apresentou significativa redução na demanda energética dos *chillers*, em relação ao sistema de *chiller* único. A redução no consumo de energia elétrica destinada a climatização chegou a 13% para edifícios com demanda por climatização durante as 24 horas do dia, significando uma diminuição de 12% nas despesas com energia elétrica, para o edifício estudado, uma redução anual de aproximadamente R\$57.000,00, quando comparada ao arranjo convencional de um único *chiller*. Essa economia em energia justifica a implementação do arranjo de *chillers* em série em edificações novas. Porém, a substituição de sistemas já existentes pelo arranjo em série só seria economicamente vantajosa após a depreciação do aparelho previamente instalado na ordem de 20% de seu COP, o que resultaria em um menor tempo de retorno do investimento.

ABSTRACT

The energy consumption reduction, both for lowering costs and providing sustainability, can be achieved through the optimization of central air conditioning systems, responsible for a big share of consumption. This problem can be solved by studying new configuration for chiller plants, by using systems with multiple chillers. This project aims to analyze the characteristics of commercial buildings where these systems are used, collecting the cooling demand profile of them through the simulation tool EnergyPlus. With these data analyzed, new settings have been modelled and then simulated to obtain new coefficients of performance. It has been observed that the use of chillers in series resulted in considerable reduction of energy demand of the chillers in series when compared to the single chiller system. The energy consumption reduction due to climatization reached 13% for buildings with demand for air conditioning during the 24 hours of the day, meaning a 12% decrease in electric energy expenses – in the case of the building under study – a reduction of approximately R\$57,000.00 per year, when compared to the conventional arrangement of a single chiller. This energy saving justifies the implementation of the system with chillers in series in new buildings. However, the replacement of existing systems by the series arrangement would only be economically advantageous after the depreciation of the previously installed device in the order of 20% of its COP, which would result in a shorter return on investment time.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carga térmica máxima do edifício comercial	13
Tabela 2 - Características do chiller único	16
Tabela 3 - Consumo energético por hora no dia 01 de Janeiro	17
Tabela 4 - Alternativas de arranjo de chillers em série.....	18
Tabela 5 - Chillers selecionados	18
Tabela 6 - Fatores de correção de capacidade e fatores de rendimento	19
Tabela 7 - Comparativo de redução no consumo.....	22
Tabela 8 - Dados do Sistema de Chiller Único utilizado no período de 12 horas	24
Tabela 9 - Redução no consumo de energia para os diferentes arranjos para o período de 12 horas	25
Tabela 10 - Custo do equipamento junto à instalação.....	26
Tabela 11 - Despesas com eletricidade para cada arranjo.....	26
Tabela 12 - Despesas com eletricidade para cada arranjo.....	27
Tabela 13 - Despesas com eletricidade para edifício de operação de 24 horas por dia ...	28
Tabela 14 - Cálculo da redução nas despesas ajustadas a valor presente para um aparelho novo.....	28
Tabela 15 - Cálculo da redução nas despesas ajustadas a valor presente para um aparelho com 20 anos de idade	29
Tabela 16 - Despesas com eletricidade para edifício de operação de 12 horas por dia ...	29
Tabela 17 - Cálculo da redução nas despesas ajustadas a valor presente para um aparelho com 0 anos de idade	30
Tabela 18 - Cálculo da redução nas despesas ajustadas a valor presente para um aparelho com 20 anos de idade	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custo da Energia Elétrica em Reais/MWh (Adaptado de FIRJAN, 2017)	1
Figura 2 - Sistema de ar condicionado central convencional (KANAS, 2015)	2
Figura 3 - Sistema de múltiplos chillers (adaptado de SALARI; ASKARZADEH, 2015)	4
Figura 4 - Esquema simplificado de uma central de água gelada (Adaptado de ALTICHE et. al, 2014).....	6
Figura 5 - Chillers em paralelo com bomba em comum (adaptado de SCHWEDLER; YATES; 2001)	8
Figura 6 - Chillers em paralelo com bombeamento individual (adaptado de SCHWEDLER; YATES; 2001).....	9
Figura 7 - Chillers em série (adaptado de SCHWEDLER; YATES; 2001)	10
Figura 8 - Arranjo em série em contrafluxo (adaptado de SCHWEDLER; YATES; 2001)	11
Figura 9 - Simplificação do arranjo de chiller único.....	12
Figura 10 - Simplificação do arranjo de chillers em série	14
Figura 11 - Carga térmica média diária durante o ano (TR)	15
Figura 12 - Carga térmica horária (TR) para o dia 01 de Junho	15
Figura 13 – Consumo de energia (kWh) para as diferentes alternativas em um dia de verão	20
Figura 14 - Consumo de energia (kWh) para as diferentes alternativas em um dia de inverno.....	21
Figura 16 - Carga térmica média (no período de 12 horas)	23
Figura 17 - Carga térmica máxima observada no dia 17 de Dezembro às 16:00.....	23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
2.1. Cronograma do projeto	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
4. CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS	6
4.1. Arranjo hidráulico dos chillers.....	7
4.1.1. Chillers em paralelo	7
4.1.2. Chillers em série.....	9
4.1.3. Chillers em série em contra fluxo	11
5. MODELAGEM.....	12
5.1. Modelagem do sistema com um único chiller.....	12
5.2. Modelagem do sistema com dois chillers em série.....	14
6. RESULTADOS.....	16
6.1. Arranjo com chiller único	16
6.2. Arranjo de chillers em série	17
6.3. Funcionamento para um período de 12 horas	22
7. ANÁLISE ECONÔMICA	25
7.1. Construção de um edifício novo	26
7.2. Substituição de um aparelho em operação	27
7. CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS	30
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS	32
APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA DE CHILLER ÚNICO PARA DIA 01 DE JANEIRO	1

APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA EM SÉRIE PARA DIA 01 DE JANEIRO – ALTERNATIVA 3.....	2
---	---

1. INTRODUÇÃO

O caminho em direção à sustentabilidade junto aos esforços para diminuir custos tem como foco o aumento da eficiência energética. Os setores que têm mais gastos com energia buscam a maior conscientização de uso, mas também soluções em tecnologia para a diminuição de consumo de energia.

O Brasil apresenta matriz energética majoritariamente limpa e de impacto ambiental moderado, podendo ser considerado um país sustentável no que se refere à energia. Entretanto, o custo do quilowatt-hora (kWh) no país é mais caro do que em outros com maior desenvolvimento socioeconômico, sendo então o custo da energia ainda mais crítico para as empresas nacionais (Figura 1).

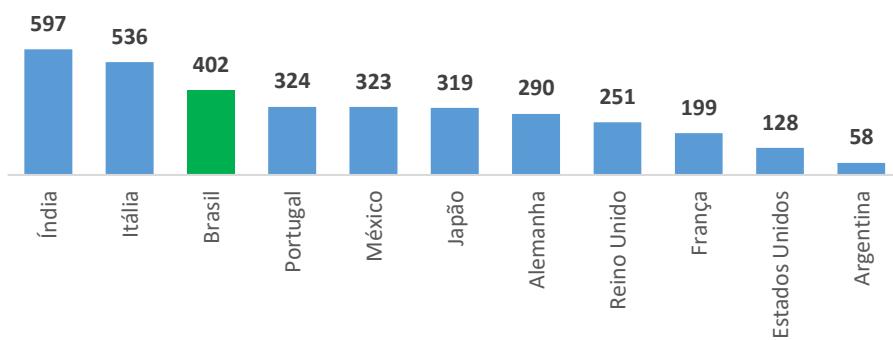


Figura 1 - Custo da Energia Elétrica em Reais/MWh (Adaptado de FIRJAN, 2017)

Em um país tropical que apresenta altas temperaturas durante todo o ano, escritórios, shopping centers e edifícios comerciais em geral demandam muita energia para refrigeração por ar condicionado, pois necessitam desse para o conforto de seus funcionários e clientes.

Buscando a diminuição do consumo de energia nesse setor, este estudo analisa possibilidades para aumentar a eficiência do sistema de refrigeração por meio de diferentes configurações para *chillers*, apresentando como resultado a redução de despesas.

2. OBJETIVOS

Com o intuito de diminuir os custos de energia de edifícios comerciais, o problema a ser estudado é a eficiência dos sistemas de climatização central. Este geralmente é apresenta três circuitos térmico, como mostrado na Figura 1: a torre de resfriamento, responsável pela rejeição de calor do

sistema; o circuito de água gelada utilizado para o resfriamento do ambiente; e o *chiller*, sendo este último o foco do presente estudo.

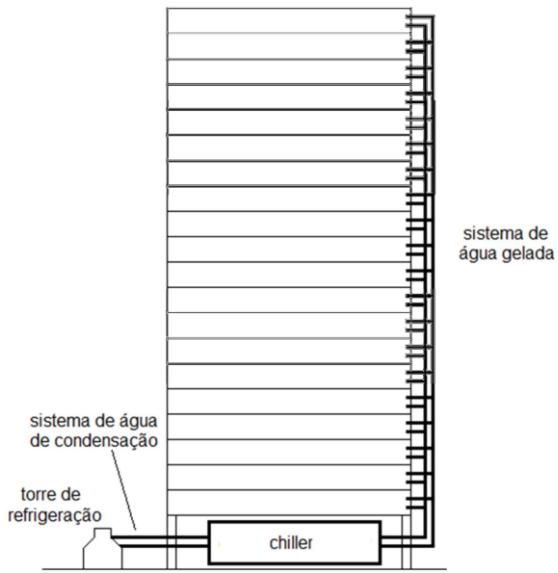


Figura 2 - Sistema de ar condicionado central convencional (KANAS, 2015)

O sistema padrão de climatização central funciona com um *chiller* único. Porém, o objetivo deste estudo é, por meio de novas abordagens, diminuir o consumo de energia para conforto térmico. Portanto, novas configurações serão analisadas, como a utilização de um sistema com mais de um *chiller* de água, associando-os em série, com condensação independente ou interligada entre esses.

No decorrer do estudo, serão modeladas essas novas propostas e por meio de simulações de diferentes cenários, será possível interpretar se essas configurações resultarão em uma diminuição de consumo, analisando também a viabilidade econômica do projeto.

2.1. Cronograma do projeto

Após a definição do escopo do estudo, é necessária a pesquisa para a atualização e melhor conhecimento das tecnologias que vêm sendo aplicadas para sistemas de ar condicionado central em edifícios comerciais. Portanto, é de extrema importância que a revisão bibliográfica seja feita antes das próximas etapas.

A caracterização da edificação e do perfil de demanda de resfriamento será realizada depois do estudo citado anteriormente. Para tanto, será necessária a ferramenta para simulação energética

chamada *EnergyPlus*. Definidas como entrada as características do edifício comercial, o programa fornece as curvas esperadas para a demanda de água gelada para refrigeração.

Em seguida, com os dados fornecidos pela ferramenta, serão apresentadas e modeladas as configurações de *chillers* de água. Com o programa EES, serão obtidos os resultados das variadas simulações, cabendo ao projeto, por fim, analisá-las, estudando a viabilidade econômica dessas e também as eventuais reduções de custo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção é responsável pela fundamentação teórica e atualização sobre o objeto de estudo, apresentando métodos sendo analisados e também utilizados para diminuir as despesas de energia em edifícios comerciais com a associação de *chillers* em série ou paralelo.

Huang; Zuo; Sohn (2016) ressaltam que os *chillers* de água, amplamente utilizados para sistemas de climatização central, são responsáveis por 35% do consumo de energia destinado à climatização. Portanto, é estudada uma maneira de aumentar a eficiência energética do sistema de *chillers*, adotando-se a estratégia de controle baseado na carga de refrigeração (CLC – *Cooling Load based Control*) em plantas de *chillers* múltiplos com duas abordagens, sendo a primeira o estudo da distribuição de carga entre *chillers* e a segunda, a identificação do número ótimo de unidades em operação.

Para a primeira abordagem, os pesquisadores buscaram a distribuição de carga ótima entre os *chillers* com o ajuste do índice de carga parcial (PLR – *Partial Load Ratio*) em cada unidade individualmente, de acordo com a carga de refrigeração dada, de maneira a alcançar o máximo coeficiente de desempenho (COP – *Coefficient of Performance*). A segunda abordagem otimiza o número de *chillers* em operação por meio da modulação de pontos críticos (CP – *Critical Point*) e do valor da temperatura de entrada da água do condensador. O resultado do estudo avalia que ambas abordagens promovem redução de consumo de energia com pouco risco quando aplicadas separadamente, mas também que, se as duas abordagens forem utilizadas ao mesmo tempo, o sistema de climatização apresentará o melhor resultado para a economia de energia.

Sistemas de climatização central com múltiplos *chillers* são comuns para se atingir diferentes cargas de refrigeração. Yu (2007) estuda estratégias para otimizar a distribuição de carga entre os *chillers*, de forma que se maximize o coeficiente agregado de performance. Convencionalmente,

os *chillers* operam com a mesma fração de carga, sendo eles de tamanhos iguais ou diferentes, já que a fração de carga é relacionada diretamente ao aumento de temperatura da água gelada.

O projeto em questão sugere que os *chillers* operem com frações de carga diferentes, estudando o comportamento dos dois *chillers* trabalhando individualmente. Pelas curvas de COP agregado em função de razão de carga dos *chillers*, o estudo obteve as duas seguintes conclusões: para um sistema com *chillers* idênticos, um deveria operar à carga total e o outro deveria operar a uma carga parcial; e, para um sistema com *chillers* de diferentes tamanhos, o maior deveria operar à carga máxima e o menor deveria operar à parcial, com a finalidade de encontrar a carga ideal para o sistema.

O artigo de Yu é importante para esta tese, pois justifica a necessidade de estudar-se o carregamento desigual dos *chillers*. Em uma primeira abordagem, será simulado a carga igual para os dois *chillers* e também um operando com 2/3 da carga e outro com 1/3.

Salari; Askarzadeh (2015) destacam a utilização de sistemas de ar condicionado central com múltiplos *chillers* em grandes edifícios comerciais para manter o conforto das pessoas que lá trabalham e, em sistemas como esses (Figura 2), é de extrema importância que a distribuição de carga nos *chillers* seja ótima, para que se obtenha o melhor COP com menor consumo de energia.

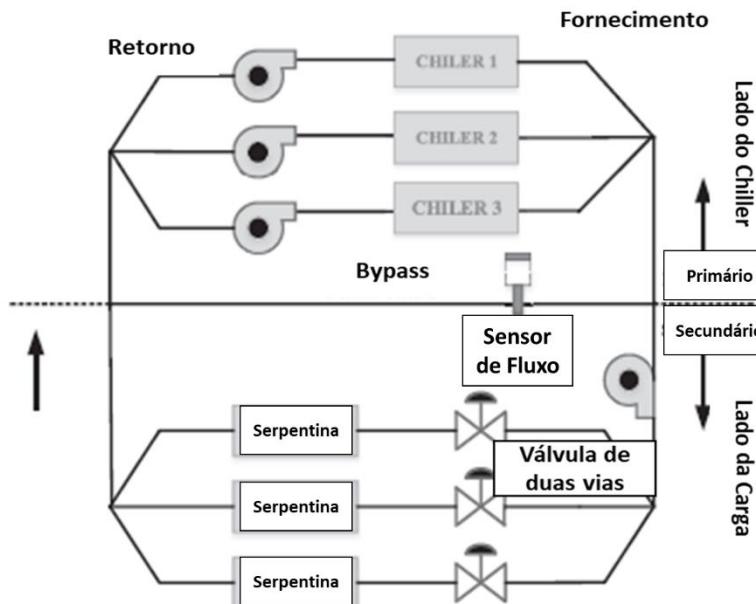


Figura 3 - Sistema de múltiplos *chillers* (adaptado de SALARI; ASKARZADEH, 2015)

Em um sistema de múltiplos *chillers*, a melhor operação decorre de quando o consumo total de energia do *chiller* em respeito da demanda de carga é minimizado. A potência consumida por cada *chiller* é função de seu índice de carga parcial (PLR). Este pode ser calculado com a razão entre a carga do *chiller* e sua capacidade total.

No estudo de Abou-Ziyan; Alajmi (2014) é ressaltada a necessidade de uma maior eficiência energética em sistemas de climatização, aquecimento e ventilação, dado que esses geralmente apresentam em torno de 70% do consumo de energia nacional. Os sistemas de múltiplos *chillers* (*multi-chiller*) têm seu desempenho alterado por fatores dinâmicos como o meio da rejeição de calor, condições do ambiente e eficiência do compressor. Além disso, outro importante fator é a carga em que cada *chiller* opera.

Usualmente, os sistemas com múltiplos *chillers* são integrados a um controle de sequenciamento que reage à demanda de carga de refrigeração do edifício. O escoamento de água passando individualmente em cada *chiller* é fixo, fazendo com que a fração de carga de cada um deles seja proporcional ao aumento de temperatura de água gelada, logo eles operam à mesma fração de carga. Esse artigo, no entanto, assim como os anteriores, discorre sobre a importância da distribuição desigual de carga entre os *chillers*.

A estratégia da operação de compartilhamento de carga (*load-sharing*), estudando-se o sistema como um todo, mas também individualmente, resultou em um desempenho agregado de COP de 1,64 a 2,18 durante as horas do dia e de 1,06 a 1,41 durante o dia todo, indicando um aumento significativo na eficiência do sistema.

No estudo de Liao; Sun; Huang (2015) é dito que para melhorar a viabilidade econômica e a eficiência energética pelas condições de carga parcial, a planta de *chillers* é sempre configurada com múltiplas unidades em paralelo. Porém, é necessário garantir que o controle de sequenciamento deles seja preciso e confiável. Esse artigo discorre sobre a existência de incertezas no processo de controle, que justifica a não utilização de controles automáticos em uma grande quantidade de prédios comerciais com *chillers* múltiplos. É feita, portanto, uma análise de robustez do sistema, tendo o objetivo de selecionar o controle mais robusto para o sequenciamento da planta de resfriamento.

Beghi, et. al (2012), por meio de um algoritmo chamado de “otimização de enxame de partículas” (*PSO – Particle Swarm Optimization*), busca alcançar reduções no consumo de energia com um melhor rastreamento do perfil de carga dos *chillers*. Descrevendo a dinâmica das plantas com alta precisão, o estudo resultou em resultados bastante consistentes quando comparados a outros algoritmos que estudam a não-linearidade dos sistemas de sequenciamento.

4. CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS

O objetivo desse estudo é analisar o desempenho de um sistema de climatização do tipo central de água gelada, ilustrado na Figura 3.

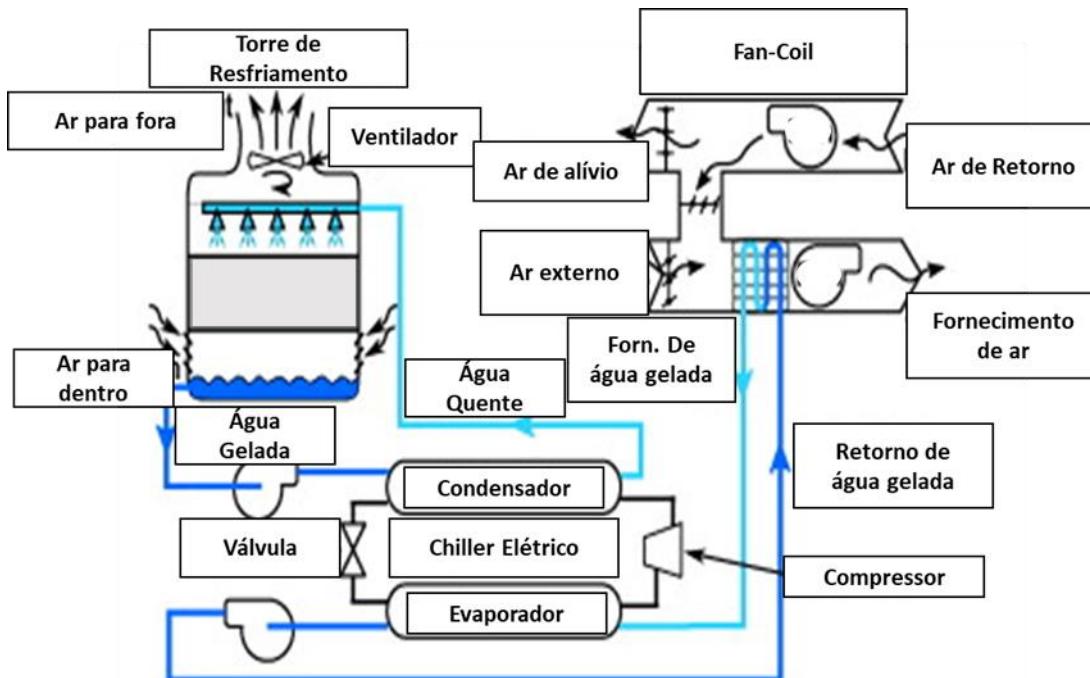


Figura 4 - Esquema simplificado de uma central de água gelada (Adaptado de ALTICHE et. al, 2014)

Entre os principais componentes do sistema, estão: *fan-coil*, que consiste em uma unidade de tratamento do ar, composta por um ventilador e uma serpentina água-ar; válvula de controle, que controla a temperatura com o ajuste da vazão de água; a tubulação de água, que distribui a água para cada *fan-coil*; bomba hidráulica, cuja função é proporcionar a circulação da água para o funcionamento do sistema; *chiller* de líquidos, que retira o calor da água; e a torre de resfriamento.

4.1. Arranjo hidráulico dos *chillers*

Junto ao desenvolvimento de novas tecnologias em válvulas e controles para a melhoria do sistema de automação em sistemas de climatização a fim da melhor eficiência energética, é importante ressaltar a importância da aplicação ótima dos conceitos de engenharia mecânica ao projetar o melhor arranjo para o sistema de climatização central de água gelada.

Em publicação na revista ABRAVA + Climatização & Refrigeração, Almeida (2017) apresenta estratégias de montagem hidráulica dos *chillers* podem ser divididas em três sub-sistemas: bombeamento, arranjo dos *chillers* no lado do condensador e arranjo dos mesmos no lado do evaporador. Em sistemas com *chillers* de condensação a água, são possíveis as montagens em série, paralelo e série em contra fluxo tanto do lado do condensador quanto do evaporador; e bombeamento constante e variável.

Para o estudo em questão, será utilizado bombeamento constante e será simulado o sistema com diferentes arranjos hidráulicos de *chillers*, verificando a eficiência energética dos sistemas em paralelo, série e série em contra fluxo, comparando os resultados com o sistema tradicional.

Um fator determinante para o arranjo do projeto é capacidade da central de água gelada. Quanto maior a potência demandada pelo edifício, maior a capacidade da central de água gelada e, portanto, mais opções de montagem e bombeamento do projeto.

4.1.1. *Chillers* em paralelo

No arranjo de *chillers* em paralelo, há um passe único dos fluidos térmicos (nesse caso, água gelada). Os *chillers*, sejam eles de mesma capacidade ou não, são montados de forma que a temperatura de entrada da água gelada de retorno é a mesma para os dois ou mais equipamentos.

De acordo com Almeida (2017), o arranjo em paralelo não demanda a utilização de *chillers* com qualquer vinculação quantitativa, no entanto há uma queda de eficiência da central de água gelada da ordem de 15% caso o diferencial de temperatura da carga atingir valores próximos a 10°C. Além disso, a vazão de fluxo deve ter uma taxa idêntica por unidade de potência frigorífica para todos os *chillers* do arranjo.

Com cargas de fluxo constante, a água gelada percorre todos os *chillers* continuamente, o que pode ocasionar na mudança da temperatura do fornecimento de água gelada ao sistema. Para esse

determinado o problema, Almeida (2017) explica que a solução seria individualizar bombas por *chillers* ou colocar válvulas de fechamento nos *chillers*, escalonando o bombeamento.

No manual da Trane Inc. – empresa especializada na manufatura de sistemas de ar condicionado, aquecimento e ventilação – redigido por Schwedler; Yates (2001), são examinados diferentes componentes, configurações e estratégias de controle de plantas de múltiplos *chillers*. Ressalta-se que se o sistema for concebido adequadamente, em alguns momentos ele pode operar com apenas um *chiller* e poupar a energia que seria gasta no segundo.

Quando os *chillers* estão dispostos da maneira apresentada pela Figura 4, com escoamento constante, a água flui nos dois *chillers*, estando eles operando ou não, alternada a temperatura de fornecimento de água gelada na unidade que está ligada, resultando em capacidades de resfriamento inadequadas.

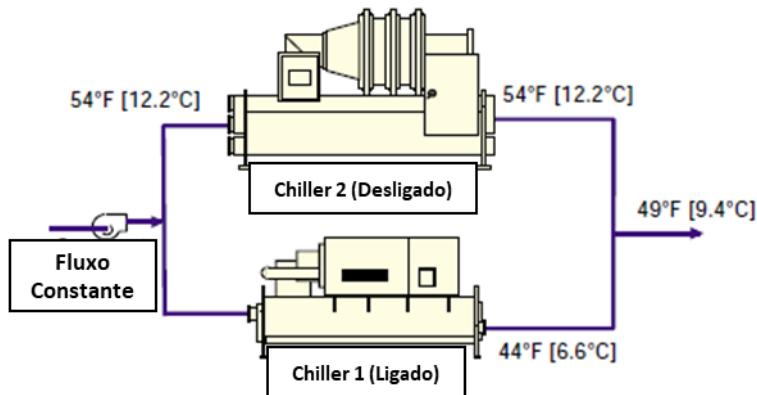


Figura 5 - *Chillers* em paralelo com bomba em comum (adaptado de SCHWEDLER; YATES; 2001)

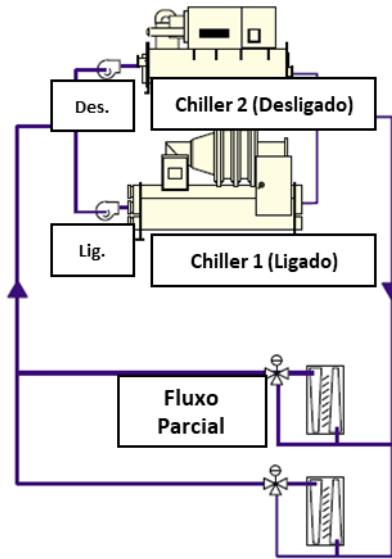


Figura 6 - *Chillers* em paralelo com bombeamento individual (adaptado de SCHWEDLER; YATES; 2001)

Se cada *chiller* apresentar uma própria bomba, como visto na Figura 5, o problema de capacidades de resfriamento inadequadas citado anteriormente não existirá, mas aparecerá outro problema. Quando somente uma bomba estiver operando, o fluxo total de água do sistema irá cair drasticamente, de acordo com a relação apresentada na curva de bombeamento da unidade ligada.

Nesse arranjo, a seleção dos *chillers* é feita para uma única temperatura de saída de água gelada e uma única temperatura de entrada da água de condensação. Cabe ao projetista do sistema, determinar a temperatura de produção de água gelada e a temperatura de resfriamento da água de condensação de acordo com a temperatura de bulbo úmido do ar da região, além de determinar os diferenciais de temperatura de ambos os processos.

4.1.2. *Chillers* em série

Segundo Almeida (2017), em um arranjo em série, o fluxo de água gelada ou de condensação segue uma ordem determinada, isto é, quando a água gelada sai de um *chiller*, ela entra em outro e, por fim, é direcionada ao sistema ou à torre.

Diferente dos *chillers* em arranjo paralelo, os *chillers* utilizados em um arranjo em série devem ter vinculação quantitativa entre eles, sendo as vazões de água e possíveis variações compatíveis, sendo pelo menos igual ao maior valor entre os mínimos e no máximo igual ao menor valor entre

os máximos. De acordo com Almeida (2017), se são utilizados dois *chillers* idênticos na montagem, o *chiller* à montante deve ser responsável por 55% da capacidade do conjunto, enquanto o *chiller* à jusante é encarregado pelos 45% complementares. Além disso, o COP do *chiller* à montante deve ser maior em aproximadamente 25% do COP do *chiller* à jusante, resultando em 12% de acréscimo da potência útil e uma redução no consumo de 11%, o que equivale a um resultado 25% melhor em relação a uma montagem em que os mesmos *chillers* estejam em paralelo para uma mesma temperatura de suprimento do fluido térmico.

Se organizados em série, como observado na Figura 6, os dois problemas citados referentes à montagem em série serão solucionados. O sequenciamento em série apresenta, porém, um novo ajuste de temperatura e vazão para os *chillers*. A vazão em cada *chiller* será igual à vazão total do sistema, ou seja, o dobro da vazão que passava nas unidades quando arranjadas em paralelo.

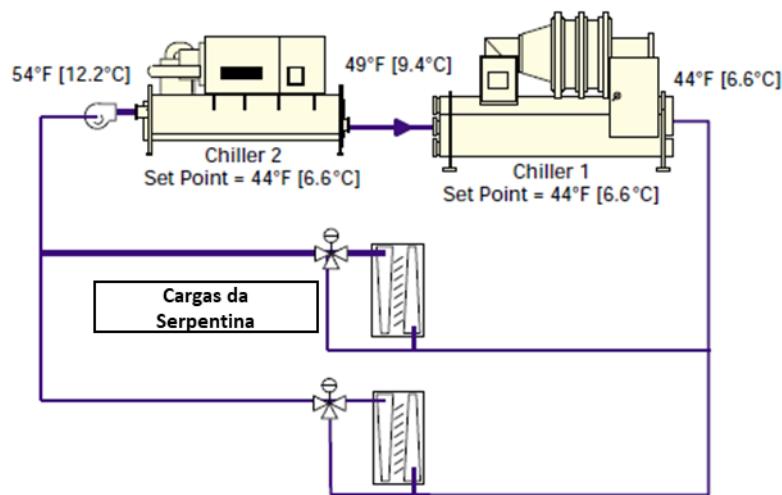


Figura 7 - *Chillers* em série (adaptado de SCHWEDLER; YATES; 2001)

Se mantidos os mesmos *chillers*, isso resultará em uma vazão menor de água gelada passando pelos *chillers*, o que causaria uma perda de eficiência no sistema. Entretanto, essa perda seria compensada pelo aumento de eficiência no primeiro *chiller*, já que esse trabalha a temperaturas mais altas. Também deve ser observada que há maior perda de carga nesse arranjo. Esse sequenciamento, portanto, terá uma operação mais adequada em condições de baixa vazão.

A seleção de *chillers* em um sistema em série é feita para a temperatura de saída da água do *chiller* à jusante e também para a saída da água do *chiller* à montante. O diferencial de temperatura da

água gelada e os parâmetros da água de condensação são determinados da mesma forma que o sistema em paralelo.

4.1.3. Chillers em série em contra fluxo

No processo em arranjo em série em contra fluxo, os fluidos térmicos circulam em sentido contrário nos trocadores de calor. Portanto, a entrada de água gelada e saída da água de condensação ocorrem em uma das extremidades do *chiller*, enquanto na outra extremidade há a saída de água gelada e entrada da água de condensação.

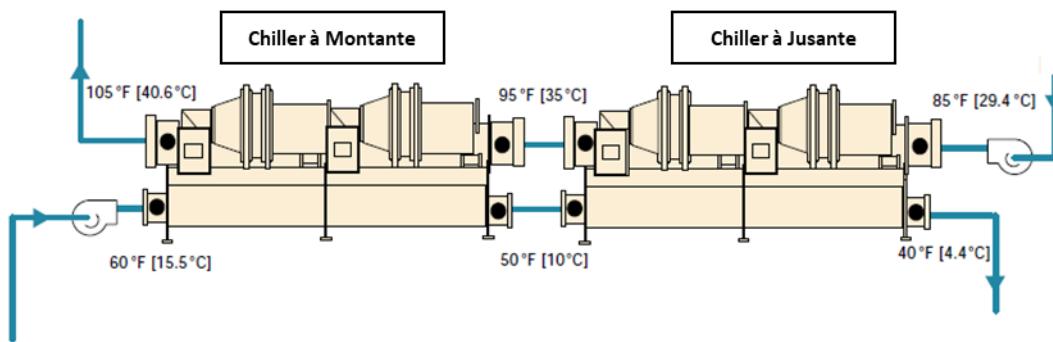


Figura 8 - Arranjo em série em contrafluxo (adaptado de SCHWEDLER; YATES; 2001)

Segundo Almeida (2017), a água do condensador em contra fluxo em um arranjo em série melhora o desempenho do *chiller*, podendo apresentar uma melhora de 5% a 7% em relação a um sistema com um único *chiller*, resultando em uma economia de até 20% de energia. De acordo com Almeida (2017), esse arranjo é vantajoso em grandes plantas de água gelada, com potências acima de 5000 TR.

Segundo o mesmo artigo publicado, esse processo apresenta melhores resultados em regiões com baixas temperaturas de bulbo úmido, onde há baixa pressão de condensação. O mais indicado para o tipo de compressor é o centrífugo, pois esse associa a maior pressão de evaporação à maior pressão de condensação (*chiller* à montante) e a menor pressão de evaporação à menor pressão de condensação (*chiller* à jusante), o que viabiliza a utilização de um mesmo compressor para os dois *chillers*.

De acordo com Almeida (2017), referente à automação do sistema, a operação dos arranjos em série e em série em contra fluxo exigem maior especialização quando comparados à operação de uma montagem em paralelo.

5. MODELAGEM

A próxima parte do estudo em questão é a modelagem do sistema de climatização de um edifício comercial com dois diferentes arranjos: um arranjo tradicional com somente um *chiller*, que é responsável pela carga térmica total do edifício de 20 andares e o arranjo em série que é o objeto de avaliação. Serão comparadas as demandas energéticas por hora de cada variação, sendo então possível verificar o consumo de energia das diferentes possibilidades. Em uma primeira abordagem, será utilizada a hipótese que esse prédio comercial opera 24 horas por dia, comum em grandes edifícios comerciais da região do Itaim Bibi e Vila Olímpia, bairros de São Paulo onde nota-se uma tendência em construção de prédios “verdes”, que apresentam alta eficiência energética.

5.1. Modelagem do sistema com um único *chiller*

A partir do software *EnergyPlus* foram levantados os dados de carga térmica, assim como as vazões de água gelada e de água do condensador e as temperaturas de entrada e saída do *chiller* e de entrada do condensador, considerando um prédio comercial climatizado com um sistema de água gelada com um arranjo de *chiller* único. Foram coletados os dados citados anteriormente para cada hora do dia em um ano.



Figura 9 - Simplificação do arranjo de *chiller* único

Para o *chiller* único, foi verificada a carga térmica total de 2.058 kW às 16:00 horas do dia 17 de dezembro, o que implica que a capacidade nominal do *chiller* deve ser maior ou igual a 2.058 kW (equivalente a aproximadamente 585 TR), para que ele possa garantir a climatização adequada para o edifício. A temperatura de saída de água gelada é fixada a 5,5°C.

Tabela 1 - Carga térmica máxima do edifício comercial

Dados do Problema	
Carga Térmica Máxima (W)	2.058.119
Carga Térmica Máxima (kW)	2.058
Carga Térmica Máxima (TR)	585
Dia de CT máxima	17-Dec-17

O dispositivo de resfriamento possui carga de desempenho

$$C_c = a + b \cdot T_{s,AG} + c \cdot (T_{s,AG})^2 + d \cdot T_{e,Cond} + e \cdot (T_{e,Cond})^2 + f \cdot T_{s,AG} \cdot T_{e,Cond} \quad (1)$$

Sendo que os fatores a, b, c, d, e, f variam de acordo com o tipo do *chiller*, apresentando valores diferentes para *chillers* centrífugos e parafusos, que serão utilizados posteriormente.

A partir da equação descrita anteriormente, é possível saber o valor corrigido para a capacidade do *chiller*, que obedece a equação a seguir:

$$C_{real} = C_c \cdot CapNominal \quad (2)$$

O fator PLR portanto é:

$$PLR = \frac{C_{real}}{Carga Térmica} \quad (3)$$

A função FPLR que será o fator de correção do COP é representada pelo seguinte polinômio:

$$FPLR = A + B \cdot PLR + C \cdot PLR^2 \quad (4)$$

Onde A, B, C são constantes características de cada tipo de *chiller*.

Com as correções feitas anteriormente, é possível finalmente obter o COP efetivo horário do *chiller*.

$$COP_{efetivo} = COP_{nominal} \cdot FPLR \quad (5)$$

A demanda efetiva será, portanto, função da carga térmica horária e o COP efetivo para essa determinada hora.

$$\dot{W}_{compressor} = \frac{Carga Térmica}{COP_{efetivo}} \quad (6)$$

$$\text{Consumo de energia} = \dot{W}_{cond} \cdot \Delta \text{tempo} [\text{kWh}] \quad (7)$$

5.2. Modelagem do sistema com dois chillers em série

Para a modelagem do sistema em série, serão utilizadas as mesmas equações, porém, a carga térmica total do edifício será dividida entre os dois chillers e as temperaturas de entrada e saída, tanto no evaporador quanto no condensador serão diferentes. Como pode ser observado na Figura 9, a temperatura de saída de água gelada no chiller 1 será a temperatura de entrada do chiller 2, o mesmo ocorre para as temperaturas do condensador.

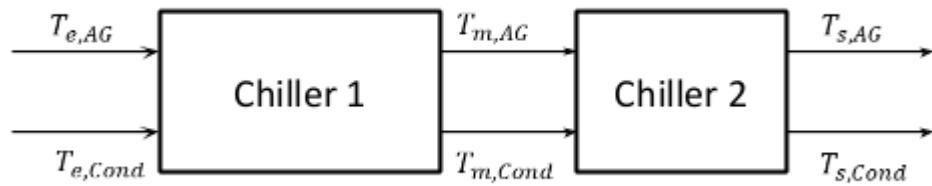


Figura 10 - Simplificação do arranjo de chillers em série

A temperatura da água gelada de saída do chiller 1 obedecerá a:

$$T_{m,AG} = T_{e,AG} - \frac{\text{CargaTérmica}_1}{\dot{m}_{AG} C_{p,AG}} \quad (8)$$

Sendo que \dot{m}_{AG} é a vazão de água gelada do sistema e $C_{p,AG}$ é o calor específico da água gelada. Quando o chiller 2 está desligado, a temperatura de saída de água gelada no chiller 1 é a mesma temperatura de saída de água gelada fixada para o chiller único.

$$T_{m,AG} = T_{s,AG} = 5,5^\circ\text{C} \quad (\text{Quando chiller 2 está desligado}) \quad (9)$$

E também a temperatura de saída de água de condensação é:

$$T_{m,Cond} = T_{e,Cond} + \frac{\text{CargaTérmica}_1 + \dot{W}_{Comp}}{\dot{m}_{Cond} C_{p,Cond}} \quad (10)$$

Sendo que \dot{m}_{Cond} é a vazão de água no condensador do sistema e $C_{p,Cond}$ é o calor específico da água no condensador.

O próximo passo é a seleção da proporção entre as cargas térmicas a serem atendidas por cada chiller. Para tanto, foi levantada a curva de carga térmica média diária para os dias do ano (Figura

10). O primeiro *chiller* será responsável pela maior parcela da carga térmica do ambiente e será selecionado de maneira que para cargas térmicas menores que sua capacidade nominal, o segundo *chiller* permanecerá desligado. Quando a demanda do ambiente aumentar a valores mais altos que sua capacidade nominal, o sistema estará operando com dois *chillers*.

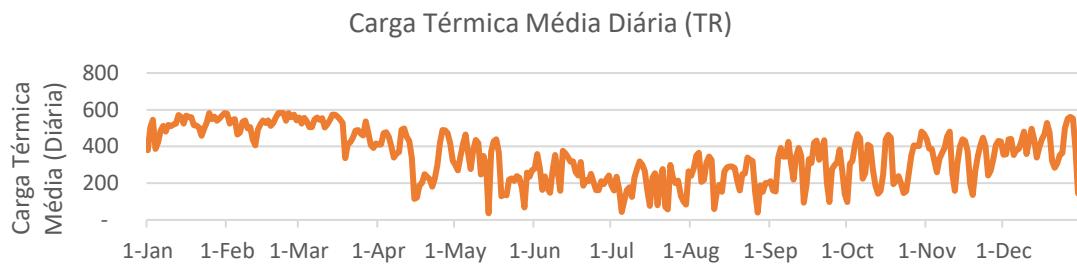


Figura 11 - Carga térmica média diária durante o ano (TR)

Vale ressaltar que, apesar de meses de outono e inverno apresentarem carga térmica média diária abaixo de 400 TR, os dias desses meses apresentam cargas térmicas horárias maiores que esse valor, como pode ser visto na Figura 11. Portanto, mesmo nesses meses, será necessária a operação dos dois *chillers*.

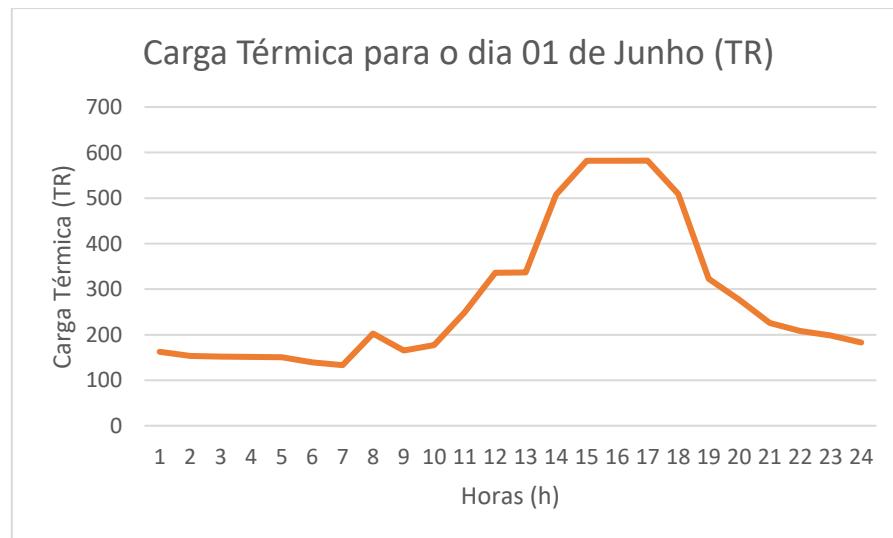


Figura 12 - Carga térmica horária (TR) para o dia 01 de Junho

6. RESULTADOS

6.1. Arranjo com *chiller* único

Como enunciado anteriormente, a carga térmica máxima do prédio comercial é de 2.058 kW, que é equivalente a 585 TR, para as 16:00h do dia 17 de dezembro. Para essa determinada demanda, foi selecionado o *chiller* centrífugo da marca Hitachi, com a denominação *Modelo de alta eficiência HC-F650GXG-SIT*, que apresenta as características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do *chiller* único

Seleção do <i>Chiller</i>	
Capacidade Nominal (TR)	625
Capacidade Nominal (W)	2.198.034
COP Nominal	6,06
Tipo de Chiller	Centrífugo
Fatores de Correção Capacidade	
A	0,4475238
B	-0,0258821
C	-0,001459053
D	0,04342595
E	-0,001000651
F	0,001920106
Fatores de Rendimento	
A	0,2778889
B	0,2338363
C	0,4883748

Com os dados de entrada (fornecidos pelo *EnergyPlus*), das equações citadas anteriormente e também dos dados fornecidos pelo catálogo da Hitachi, pode-se calcular o consumo energético por hora, fornecidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Consumo energético por hora no dia 01 de Janeiro

Data	Hora	Carga Térmica Chiller (W)	Correção Capacidade	Capacidade Real (W)	PLR	FPLR	COP Efetivo	Demanda Efetiva (Wh)
1-Jan	1	1.154.121	0,97	2.136.373	0,54	0,55	3,31	348.335
1-Jan	2	786.661	0,94	2.067.262	0,38	0,44	2,65	296.652
1-Jan	3	802.470	0,93	2.053.102	0,39	0,44	2,69	298.316
1-Jan	4	833.435	0,94	2.058.857	0,40	0,45	2,74	303.884
1-Jan	5	796.767	0,94	2.058.110	0,39	0,44	2,68	297.728
1-Jan	6	722.912	0,93	2.045.098	0,35	0,42	2,55	282.972
1-Jan	7	715.551	0,93	2.037.155	0,35	0,42	2,55	280.951
1-Jan	8	769.076	0,93	2.044.410	0,38	0,43	2,64	291.770
1-Jan	9	883.249	0,94	2.061.626	0,43	0,47	2,83	311.626
1-Jan	10	1.066.635	0,95	2.088.948	0,51	0,52	3,18	335.506
1-Jan	11	1.362.045	0,97	2.121.814	0,64	0,63	3,81	357.194
1-Jan	12	1.646.285	0,98	2.149.618	0,77	0,74	4,51	365.426
1-Jan	13	1.787.009	0,98	2.160.617	0,83	0,81	4,88	366.149
1-Jan	14	1.920.840	0,99	2.165.814	0,89	0,87	5,27	364.577
1-Jan	15	1.853.242	0,99	2.166.534	0,86	0,84	5,06	366.134
1-Jan	16	1.710.127	0,98	2.160.514	0,79	0,77	4,66	366.988
1-Jan	17	1.604.989	0,98	2.154.056	0,75	0,72	4,38	366.192
1-Jan	18	1.584.924	0,98	2.151.367	0,74	0,72	4,33	365.678
1-Jan	19	1.612.311	0,98	2.151.956	0,75	0,73	4,41	365.849
1-Jan	20	1.686.986	0,98	2.156.134	0,78	0,76	4,60	366.380
1-Jan	21	1.679.511	0,98	2.157.948	0,78	0,76	4,58	366.738
1-Jan	22	1.665.291	0,98	2.156.503	0,77	0,75	4,54	366.552
1-Jan	23	1.684.772	0,98	2.157.482	0,78	0,76	4,60	366.628
1-Jan	24	1.688.250	0,98	2.158.118	0,78	0,76	4,60	366.719

Foram calculados os dados apresentados na Tabela 3 para um ano inteiro, sendo possível calcular o consumo de energia anual de 2.586 MWh destinado à climatização dos ambientes.

6.2. Arranjo de *chillers* em série

Para o arranjo em série, serão analisadas três diferentes alternativas, a fim de encontrar a maior redução no consumo energético dos *chillers*. As alternativas estudadas são as apresentadas na Tabela 4. A primeira delas é a distribuição da carga térmica igualitária entre os *chillers*, ou seja, cada um deles respondendo por metade da carga térmica do sistema. A segunda é quando o primeiro

chiller responde por dois terços da carga térmica do sistema e o segundo *chiller*, por um terço. A terceira alternativa foi encontrada por meio de algumas iterações realizadas com os *chillers* disponíveis no mercado, testando diferentes proporções entre as capacidades nominais dos *chillers*, encontrando uma redução no consumo considerável, devido à redução na ociosidade.

Tabela 4 - Alternativas de arranjo de *chillers* em série.

Capacidade Nominal (TR) dos <i>Chillers</i>			
Arranjos	<i>Chiller 1</i>	<i>Chiller 2</i>	
<i>Chiller Único</i>	625	n.a.	
Alternativa 1	1/2 + 1/2	325	325
Alternativa 2	2/3 + 1/3	425	250
Alternativa 3	Alternativa	475	110

É feita uma condição de entrada para o sistema. Quando a carga térmica do ambiente é maior que a capacidade nominal do primeiro *chiller*, liga-se o segundo *chiller*, caso contrário, o sistema opera com um sistema com um único *chiller* (*chiller 1*).

No catálogo de *chillers* centrífugos e parafusos da fabricante Hitachi, foram selecionados para as seguintes alternativas os *chillers* apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - *Chillers* selecionados

Carga Térmica do <i>Chiller</i>		
Arranjos	<i>Chiller 1</i>	<i>Chiller 2</i>
<i>Chiller Único</i>	Centrífugo (HC-F650GXG-SIT)	
Alternativa 1	Centrífugo (HC-F350GXG-SIT)	Centrífugo (HC-F350GXG-SIT)
Alternativa 2	Centrífugo (HC-F450GXG-SIT)	Centrífugo (HC-F300GXG-SIT)
Alternativa 3	Centrífugo (HC-F500GXG-SIT)	Parafuso (RCU110WSZ2B)

Os seguintes *chillers* possuem os seguintes fatores de correção de capacidade e de rendimento (Tabela 6).

Tabela 6 - Fatores de correção de capacidade e fatores de rendimento

Fatores de Correção Capacidade	Centrífugo	Parafuso
a	0,4475238	0,6228513
b	-0,0258821	-0,008700783
c	-0,001459053	0,00097198
d	0,04342595	0,005184584
e	-0,001000651	0,00049517
f	0,001920106	-0,000963237
Fatores de Rendimento	Centrífugo	Parafuso
A	0,2778889	0,03295553
B	0,2338363	0,9114398
C	0,4883748	0,05565265

A fim de encontrar o consumo energético anual do edifício comercial devido aos *chillers* e calcular a redução da demanda, foram modelados os COPs efetivos de cada *chiller* para cada horário do ano. Um exemplar para os resultados para os COPs efetivos, assim como PLR e demais fatores de correção estão dispostos em apêndice.

Nas Figuras 13 e 14, podemos encontrar o perfil do consumo energético de cada *chiller* para cada alternativa para cada hora do dia, em um dia de verão e um dia de inverno, respectivamente.

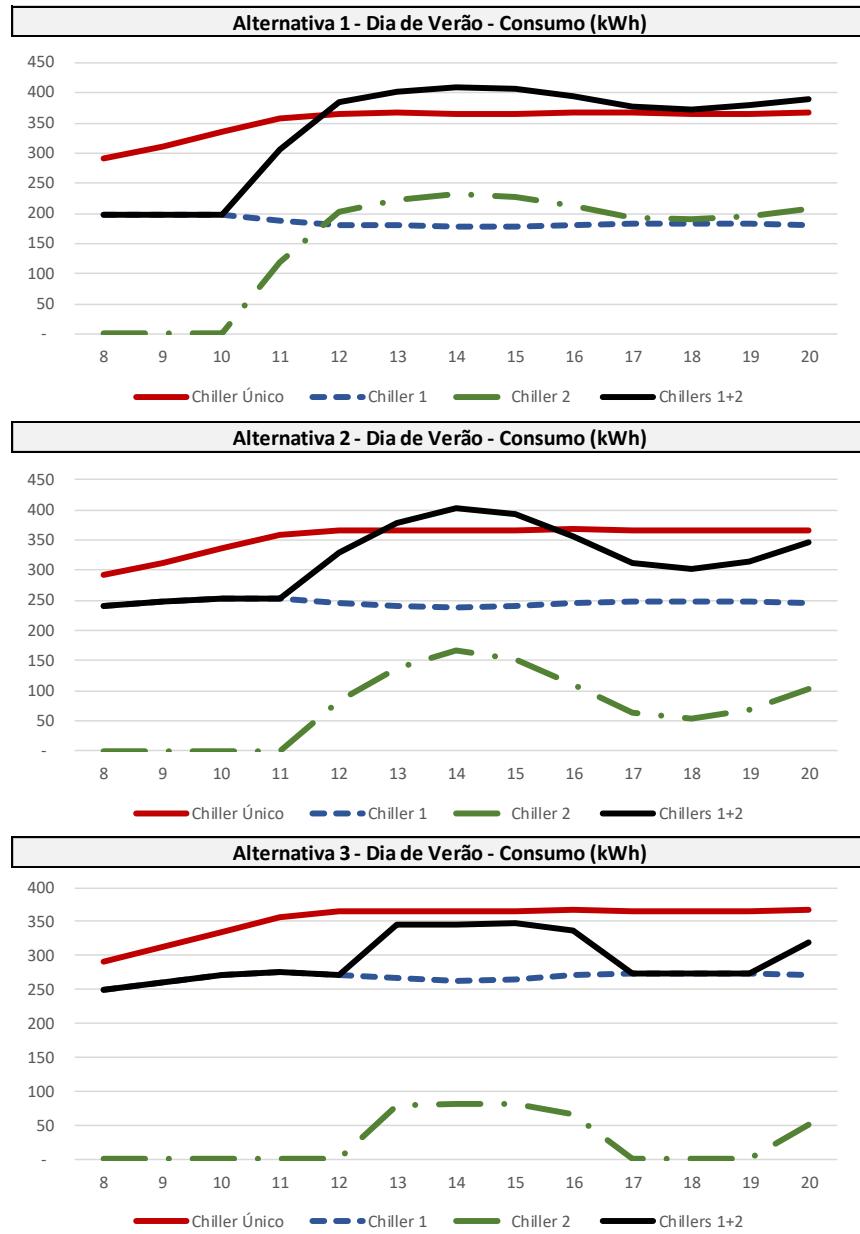


Figura 13 – Consumo de energia (kWh) para as diferentes alternativas em um dia de verão

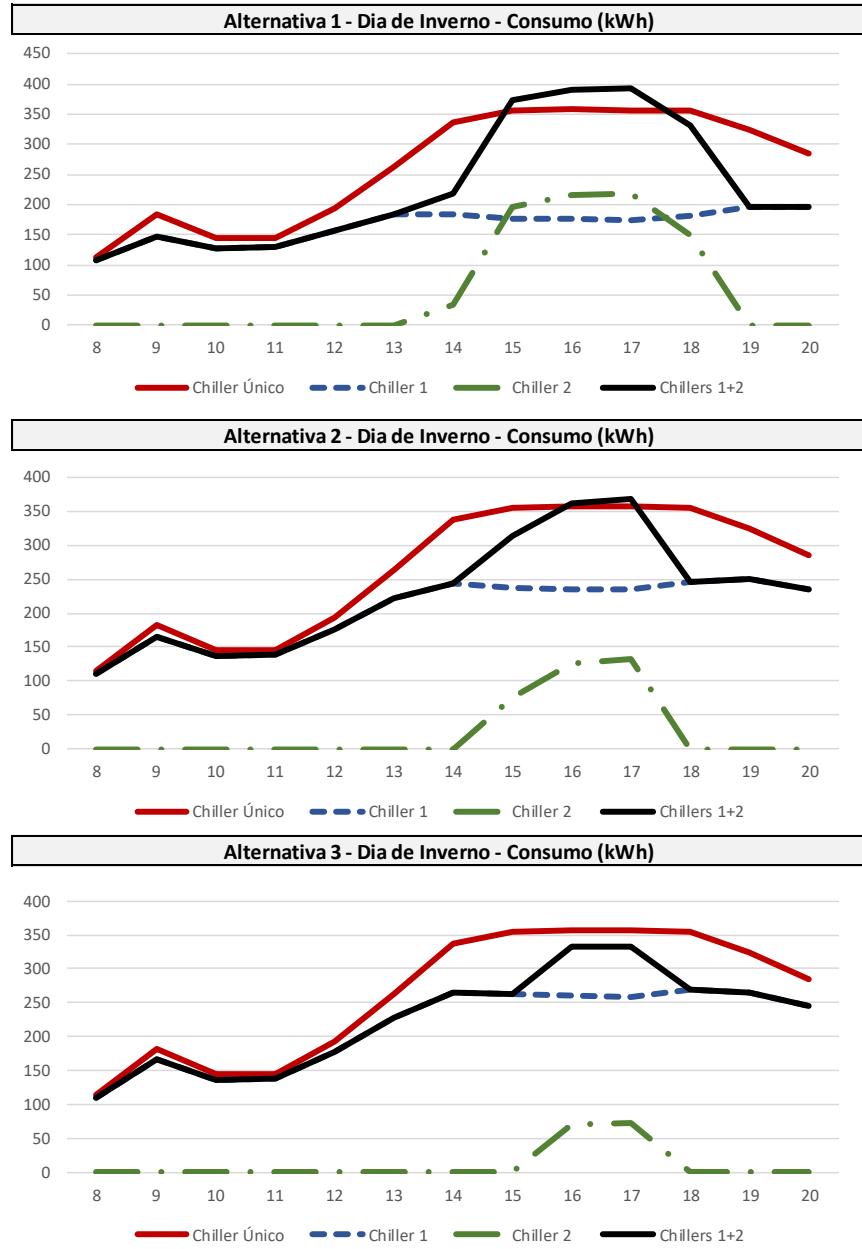


Figura 14 - Consumo de energia (kWh) para as diferentes alternativas em um dia de inverno

Graças aos gráficos apresentados na figura 13 e 14, é fácil visualizar que no arranjo metade/metade (alternativa 1), o *chiller* 2 encontra-se ligado durante muito mais tempo do que nas outras alternativas, já que a capacidade nominal do *chiller* 1 é a menor entre as alternativas. Isso faz com que o *chiller* 2 opere muito mais frequentemente, mesmo que com uma proporção baixa de sua capacidade nominal, o que é prejudicial à sua eficiência.

A Tabela 7 dispõe os resultados finais da modelagem, ou seja, a redução no consumo para cada configuração, permitindo visualizar que a maior eficiência energética é obtida na alternativa 3, onde o consumo de energia elétrica do edifício destinada aos *chillers* é reduzido em 13%.

Tabela 7 - Comparativo de redução no consumo

Comparativo	
Consumo Anual - Chiller Único (GWh)	2,586
Consumo Anual - Alternativa 1 (GWh)	2,384
Aumento/Redução no Consumo	-8%
Consumo Anual - Alternativa 2 (GWh)	2,441
Aumento/Redução no Consumo	-6%
Consumo Anual - Alternativa 3 (GWh)	2,261
Aumento/Redução no Consumo	-13%

6.3. Funcionamento para um período de 12 horas

Como uma análise paralela, foi analisado o sistema com um único *chiller* de água e também de *chillers* em série em um prédio com demanda por climatização somente das 08:00 até as 20:00. Com essa análise, é possível estender o estudo em questão para edifícios que operam durante o horário comercial, vendo os impactos positivos da utilização de dois *chillers* em série para esses.

Analogamente ao estudo realizado para um prédio de funcionamento de 24 horas, serão levantadas as cargas térmicas médias e diárias para o horário de demanda energética destinada a climatização para um edifício que funciona em um período de 12 horas.

Nesse caso, a curva da carga térmica média diária (calculada no período de 12 horas) é apresentado na Figura 16. A maior carga térmica média diária é igual a 583 TR, observada nos dias 17 e 18 de Janeiro. Já a carga térmica máxima é observada também no dia 17 de Dezembro, às 16:00.

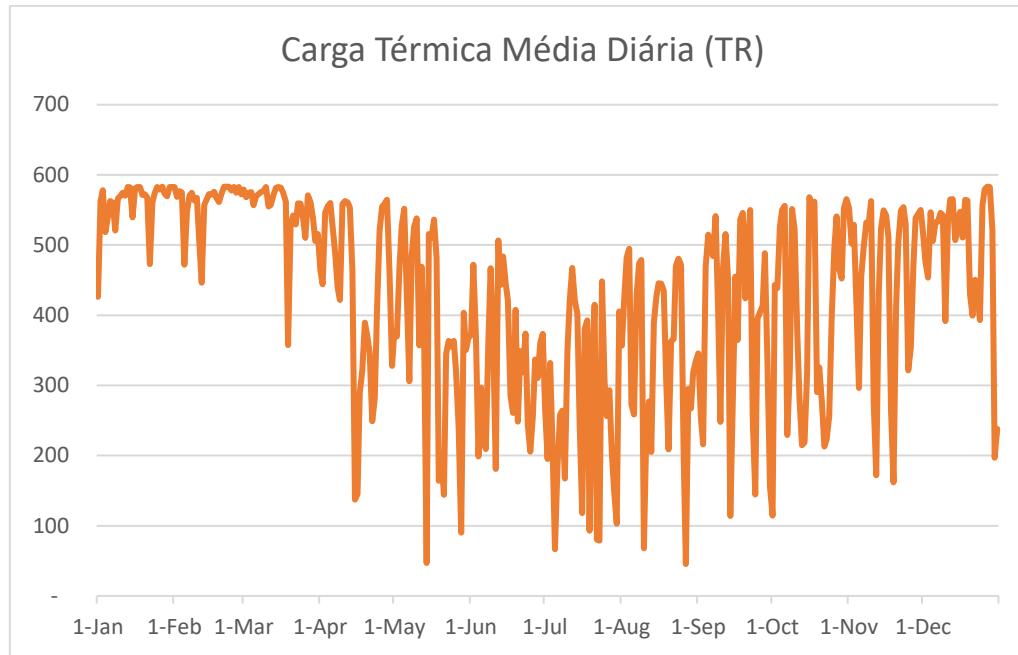


Figura 15 - Carga térmica média (no período de 12 horas)

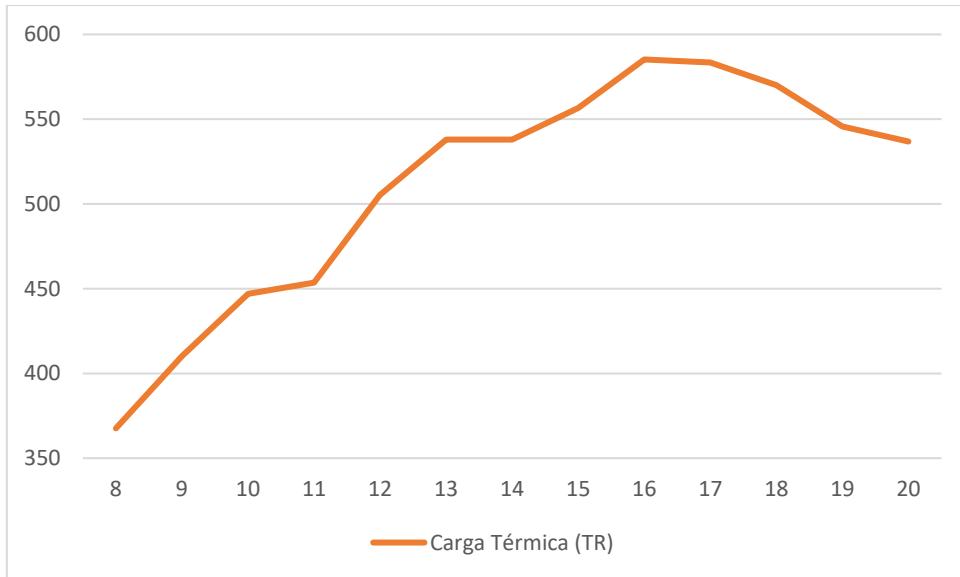


Figura 16 - Carga térmica máxima observada no dia 17 de Dezembro às 16:00

Como a carga térmica máxima observada nessa análise é a mesma da anterior, o *chiller* único que será utilizado é o mesmo, *chiller* centrífugo da marca Hitachi, com a denominação *Modelo de alta eficiência HC-F650GXG-SIT*.

Tabela 8 - Dados do Sistema de *Chiller* Único utilizado no período de 12 horas

Dados do Problema	
Carga Térmica Máxima (W)	2.058.119
Carga Térmica Máxima (kW)	2.058
Carga Térmica Máxima (TR)	585
Dia de CT máxima	17-Dec-17
Seleção do <i>Chiller</i>	
Capacidade Nominal (TR)	625
Capacidade Nominal (W)	2.198.034
COP Nominal	6,06
Tipo de <i>Chiller</i>	Centrífugo
Fatores de Correção Capacidade	
a	0,4475238
b	-0,0258821
c	-0,001459053
d	0,04342595
e	-0,001000651
f	0,001920106
Fatores de Rendimento	
A	0,2778889
B	0,2338363
C	0,4883748
Demanda Anual	
Demandada Energética (GWh)	1,542

A demanda energética para o edifício que trabalha em horário comercial é de 1,542 GWh, como observado na Tabela 8. Esse resultado equivale a aproximadamente 60% da demanda energética do prédio com demanda por climatização durante as 24 horas do dia, o qual foi analisado previamente.

Agora, utilizando as mesmas 3 alternativas de *chillers* em série já utilizadas previamente, é possível obter os seguintes resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 - Redução no consumo de energia para os diferentes arranjos para o período de 12 horas

Comparativo	
Consumo Anual - Chiller Único (GWh)	1,542
Consumo Anual - Alternativa 1 (GWh)	1,504
Aumento/Redução no Consumo	-2%
Consumo Anual - Alternativa 2 (GWh)	1,525
Aumento/Redução no Consumo	-1%
Consumo Anual - Alternativa 3 (GWh)	1,362
Aumento/Redução no Consumo	-12%

Como resultado da análise, é possível concluir que tanto para um prédio comercial que opera 24 horas por dia com climatização, quanto para um edifício que somente demanda durante 12 horas, há uma redução significativa no consumo de energia elétrica.

A redução no consumo de energia elétrica destinada à climatização é maior na alternativa 3, já que essa tem como objetivo que os *chillers* operem com menor ociosidade, pois quanto mais perto de sua carga nominal, melhor será o seu COP efetivo, aproximando-se de seu valor nominal.

7. ANÁLISE ECONÔMICA

A fim de quantificar a economia de energia em valores monetários, analisando então quando a substituição do sistema convencional com um único *chiller* para um sistema com arranjo em série é vantajosa, foram calculadas as despesas com energia elétrica na edificação em análise.

Para a análise econômica, foi utilizada a tarifa de energia elétrica da AES Eletropaulo, concessionária de distribuição de energia elétrica na cidade de São Paulo, disponível no *website* da companhia. Para clientes corporativos em tarifa horária verde, a tarifa do uso do Sistema de Distribuição (TUSD) é de R\$0,43987/kWh para ponta (das 17h30 às 20h30) e de R\$0,03677/kWh para os demais horários. Através dessas duas tarifas, foi levantado consumo de energia elétrica para cada um dos arranjos.

Dois casos foram estudados, sendo o primeiro a instalação do sistema de *chillers* em série em um edifício novo em construção e o segundo, a substituição em um edifício já existente de um sistema convencional com *chiller* único para um arranjo em série. Foram levados em conta o custo da

máquina e a instalação de R\$5.100/TR para *chillers* centrífugos e R\$4.600/TR para *chillers* parafusos. Foi tomada a hipótese que não há variações de consumo nos demais componentes do sistema, nem a troca desses equipamentos.

A Tabela 10 mostra que a alternativa 3 apresenta custo menor que os demais arranjos, pois enquanto as demais alternativas são compostas de *chillers* centrífugos, os quais são mais caros, ela possui um *chiller* parafuso em sua composição.

Tabela 10 - Custo do equipamento junto à instalação

	Capacidade Nominal (TR)		Tipo		Investimento (R\$)		
	<i>Chiller</i> 1	<i>Chiller</i> 2	<i>Chiller</i> 1	<i>Chiller</i> 2	<i>Chiller</i> 1	<i>Chiller</i> 2	Total
<i>Chiller</i> Único	625		Centrífugo		3.187.500		3.187.500
Alternativa 1	325	325	Centrífugo	Centrífugo	1.657.500	1.657.500	3.315.000
Alternativa 2	425	250	Centrífugo	Centrífugo	2.167.500	1.275.000	3.442.500
Alternativa 3	475	110	Centrífugo	Parafuso	2.422.500	506.000	2.928.500

7.1. Construção de um edifício novo

7.1.1. Operação 24 horas por dia

Para o edifício que opera 24 horas por dia com demanda por climatização, a redução nas despesas com eletricidade segue em linha com a redução no consumo anual (Tabela 11), seguindo a alternativa 3 como a mais econômica, com redução de 12%, o que significa uma economia de R\$56.907,00 anualmente se comparado ao *chiller* único.

Tabela 11 - Despesas com eletricidade para cada arranjo

Arranjo	Consumo Anual (GWh)	Despesas com Eletricidade (R\$)	Redução de Despesas
<i>Chiller</i> Único	2,59	458.219	
Alternativa 1	2,38	423.400	-8%
Alternativa 2	2,44	435.214	-5%
Alternativa 3	2,26	401.312	-12%

7.1.2. Operação 12 horas por dia

Para o edifício que opera somente 12 horas por dia com demanda por climatização, a redução nas despesas com eletricidade também é mais significativa para a alternativa 3, apresentando também 12% de redução, ou seja, uma redução nominal de R\$29.463,00.

Tabela 12 - Despesas com eletricidade para cada arranjo

Arranjo	Consumo Anual (GWh)	Despesas com Eletricidade (R\$)	Redução de Despesas
<i>Chiller Único</i>	1,54	252.426	
Alternativa 1	1,50	246.320	-2%
Alternativa 2	1,52	250.201	-1%
Alternativa 3	1,36	222.963	-12%

Portanto, é possível concluir que para a instalação em um edifício novo em construção, a alternativa 3 é significantemente positiva, já que anualmente refletirá em uma redução de 12% nas despesas com eletricidade do edifício, tanto para operações durante 24 horas por dia, quanto para 12 horas.

7.2. Substituição de um aparelho em operação

Para o caso onde se estuda a substituição de uma instalação já existente de um sistema de *chiller* único para um novo, com um arranjo de *chillers* em série, assumiu-se que os aparelhos já instalados apresentam uma depreciação em seu COP, já que se estima que há uma perda de aproximadamente 1% em sua eficiência para cada ano de operação.

Portanto, foram levantadas as despesas com eletricidade para a instalação já existente, em cinco diferentes cenários, para uma instalação nova, sem depreciação, e também para um edifício com aparelhos com idades de 5, 10, 15 e 20 anos.

7.2.1. Operação 24 horas por dia

A tabela 13 dispõe as despesas com eletricidade para os sistemas previamente instalados nos diferentes cenários de idade, além das despesas com eletricidade de cada alternativa de arranjos em série para um edifício com demanda por climatização durante as 24 horas do dia. Observa-se que a redução nas despesas anuais com eletricidade devido à climatização varia de R\$56.907,00, da

alternativa 3 para um *chiller* único novo, para R\$386.818,00, da alternativa 3 para um *chiller* de 20 anos com perda de 20% em sua eficiência.

Tabela 13 - Despesas com eletricidade para edifício de operação de 24 horas por dia

Instalação de <i>Chiller</i> Único				
Idade	Depreciação do COP	COP Depreciado	Consumo Annual (GWh)	Despesas com Eletricidade (R\$)
0	0,0%	6,06	2,59	458.219
5	5,0%	5,76	2,72	482.336
10	10,0%	5,45	3,02	535.929
15	15,0%	5,15	3,56	630.504
20	20,0%	4,85	4,45	788.130
Instalação de <i>Chillers</i> em Série				
Arranjo		Consumo Annual (GWh)		Despesas com Eletricidade (R\$)
Alternativa 1		2,38		423.400
Alternativa 2		2,44		435.214
Alternativa 3		2,26		401.312

Como a alternativa 3 apresenta a maior redução nas despesas anuais com eletricidade, ela será utilizada para o cálculo de tempo de retorno do investimento (*payback*), sendo esse igual ao custo da aparelhagem e da instalação do arranjo da alternativa 3, que é composta por um *chiller* centrífugo de 475TR e um parafuso de 110TR, estimado em R\$2.928.500,00.

A redução nas despesas de energia é ajustada à inflação para os próximos anos, estimada em 5% aa e a taxa de desconto utilizada para trazer as reduções futuras a valor presente é a taxa SELIC, que no momento em que esse estudo foi realizado, estava a 7,50% aa.

Tabela 14 - Cálculo da redução nas despesas ajustadas a valor presente para um aparelho novo

Idade: 0 anos	Redução no Consumo (R\$)				
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Redução no Consumo	56.907	59.752	62.740	65.877	69.171
Taxa de Desconto	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%
Redução Descontada	52.937	51.706	50.503	49.329	48.182

Tabela 15 - Cálculo da redução nas despesas ajustadas a valor presente para um aparelho com 20 anos de idade

Idade: 20 anos	Redução no Consumo (R\$)				
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Redução no Consumo	386.818	406.159	426.467	447.791	470.180
Taxa de Desconto	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%
Redução Descontada	359.831	351.463	343.289	335.306	327.508

As tabelas 14 e 15 mostram a redução nas despesas com energia elétrica devido à climatização dos ambientes, ajustadas a valor presente. O tempo de retorno do investimento para a substituição de um aparelho de 20 anos, com perda estimada de 20% em seu COP, é de 8,5 anos. Esse tempo de retorno aumenta para 16 anos em um aparelho de 15 anos. Para aparelhos com perdas em seu COP menores que 15%, a troca passa a não fazer sentido, já que o tempo de retorno ultrapassa 20 anos, o que implicaria em uma perda de eficiência do novo arranjo.

7.2.2. Operação 12 horas por dia

O mesmo estudo apresentado anteriormente foi feito para um edifício com demanda por climatização em 12 horas do dia.

Tabela 16 - Despesas com eletricidade para edifício de operação de 12 horas por dia

Instalação de Chiller Único				
Idade	Depreciação do COP	COP Depreciado	Consumo Annual (GWh)	Despesas com Eletricidade (R\$)
0	0,0%	6,06	1,54	252.426
5	5,0%	5,76	1,62	265.711
10	10,0%	5,45	1,80	295.235
15	15,0%	5,15	2,12	347.335
20	20,0%	4,85	2,65	434.169
Instalação de Chillers em Série				
Arranjo		Consumo Annual (GWh)	Despesas com Eletricidade (R\$)	
Alternativa 1		1,50	246.320	
Alternativa 2		1,52	250.201	
Alternativa 3		1,36	222.963	

Tabela 17 - Cálculo da redução nas despesas ajustadas a valor presente para um aparelho com 0 anos de idade

Idade: 0 anos	Redução no Consumo (R\$)				
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Redução no Consumo	29.463	30.936	32.483	34.107	35.812
Taxa de Desconto	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%
Redução Descontada	27.407	26.770	26.147	25.539	24.945

Tabela 18 - Cálculo da redução nas despesas ajustadas a valor presente para um aparelho com 20 anos de idade

Idade: 20 anos	Redução no Consumo (R\$)				
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Redução no Consumo	211.206	221.766	232.854	244.497	256.722
Taxa de Desconto	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%	7,50%
Redução Descontada	196.470	191.901	187.439	183.080	178.822

Os resultados apresentados nas Tabelas 17 e 18 mostram que a redução nas despesas com energia elétrica devido a climatização no caso da operação de 12 horas por dia é menor frente ao investimento a ser feito devido a compra do novo equipamento. Portanto, o tempo de retorno é显著mente maior, chegando a 18 anos no caso onde o aparelho instalado já tem 20 anos (com perda de 20% em eficiência), o que não justificaria uma troca do sistema existente para o arranjo em série.

7. CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS

Com a modelagem, foi verificado que o arranjo em série é uma boa alternativa para reduzir o consumo de energia destinado à climatização em um prédio comercial, apresentando uma significativa redução na demanda energética dos *chillers*. A redução no consumo de energia elétrica destinada a climatização chegou a 13% para edifícios com demanda por climatização durante as 24 horas do dia, significando uma diminuição de 12% nas despesas com energia elétrica, para o edifício estudado, uma redução de aproximadamente R\$57.000,00, quando comparada ao arranjo convencional de um único *chiller*. Essa economia em energia justifica a implementação do arranjo de *chillers* em série em edificações novas. Porém, a substituição de sistemas já existentes pelo arranjo em série só seria economicamente vantajosa após a depreciação do aparelho previamente

instalado na ordem de 20% de seu COP, o que resultaria em um menor tempo de retorno do investimento. Adicionalmente, vale notar que parte da redução notada no consumo de energia elétrica para os arranjos em série podem vir do fato que o *chiller* único utilizado como referência tinha capacidade nominal acima da carga térmica máxima, o que resulta em uma operação com certa ociosidade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

- ABOU-ZIYAN, H. Z., ALAJMI, A. F., **Effect of load-sharing operation strategy on the aggregate performance of existed multiple-*chiller* systems**, Applied Energy 135 (2014), 329-338p.
- ALTICHE, A., MANLAPAZ, E. J., GLIPONEO, R., BRIMON, E., DUGAN, K. **Chilled Water Airconditioning System** (2014), 30p.
- ALMEIDA, R. **ABRAVA + Climatização & Refrigeração**, 16-23p, Fevereiro 2017
- BEGHI, A., CECCHINATO, L., COSI, G., RAMPAZZO, M., **A PSO-based algorithm for optimal multiple *chiller* systems operation**, Applied Thermal Engineering 32 (2012), 31-40p.
- CATÁLOGO, Hitachi, HC-F600GXG-SIT, HC-F500GXG-SIT: disponível em http://www.hitachiapb.com.br/static/site/files/Cat_Centrifuga_Inverter_CTF0200_MAI_2014.pdf (pág: 6), acessado em 01/06/2017
- CATÁLOGO, Hitachi, RCU110WSZ2B: disponível em <http://www.hitachiapb.com.br/produto/chiller-parafuso-a-agua> acessado em 01/06/2017
- FIRJAN. QUANTO CUSTA A ENERGIA ELÉTRICA –Disponível em <http://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm> acessado em 08/11/2017
- HUANG, S., ZUO, W., SOHN, M. D. **Amelioration of the cooling load based *chiller* sequencing control**, Applied Energy 168 (2016), 204-215p.
- KANAS, W. F. **Estudo de otimização de sistemas de resfriamento por variação de sequenciamento de *chillers***, Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica (2015), 42p.
- LIAO, Y., SUN, Y., HUANG, G. **Robustness analysis of *chiller* sequencing control**, Energy Conversion and Management 103 (2015), 180-190p.
- SALARI, E., ASKARZADEH, A. **A new solution for loading optimization of multi-*chiller* systems by general algebraic modeling system**, Applied Thermal Engineering 84 (2015), 429-436p.
- SCHWEDLER, M., YATES, A. **Multiple-Chiller-System Design and Control**, TRANE Application Engineering Manual (2012), 27-35p.

TARIFA DE ENERGIA ELÉTRICA – AES ELETROPAULO: disponível em <https://www.aeseletropaulo.com.br/cliente-corporativo/prazos-e-tarifas/conteudo/tarifa-de-energia-eletrica> acessado em 08/11/2017

YU, F. W., CHAN, K. T. **Optimum load sharing strategy for multiple-*chiller* systems serving air-conditioned buildings**, Building and Environment 42 (2007), 1581-1593p.

APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA DE *CHILLER* ÚNICO PARA DIA 01 DE JANEIRO

Data	Hora	Carga Térmica Chiller (W)	Vazão mássica AG (kg/s)	TeAG (°C)	TsAG (°C)	Vazão mássicaCond (kg/s)	TeCond (°C)	TsCond (°C)	Correção Capacidade (CC)	Capacidade Real (CR)	PLR	FPLR	COP Efetivo	Demanda Efetiva (Wh)
1-Jan	1	1154121	32,6	14,76	5,50	112,8	22,82	25,93	0,97	2136373	0,54	0,55	3,31	348335
1-Jan	2	786661	22,6	14,63	5,50	112,8	20,00	22,15	0,94	2067262	0,38	0,44	2,65	296652
1-Jan	3	802470	23,0	14,62	5,50	112,8	19,55	21,74	0,93	2053102	0,39	0,44	2,69	298316
1-Jan	4	833435	23,9	14,64	5,50	112,8	19,73	22,00	0,94	2058857	0,40	0,45	2,74	303884
1-Jan	5	796767	22,8	14,63	5,50	112,8	19,71	21,88	0,94	2058110	0,39	0,44	2,68	297728
1-Jan	6	722912	20,9	14,57	5,50	112,8	19,31	21,30	0,93	2045098	0,35	0,42	2,55	282972
1-Jan	7	715551	20,7	14,54	5,50	112,8	19,08	21,04	0,93	2037155	0,35	0,42	2,55	280951
1-Jan	8	769076	22,2	14,58	5,50	112,8	19,29	21,39	0,93	2044410	0,38	0,43	2,64	291770
1-Jan	9	883249	25,2	14,66	5,50	112,8	19,82	22,22	0,94	2061626	0,43	0,47	2,83	311626
1-Jan	10	1066635	30,2	14,76	5,50	112,8	20,75	23,62	0,95	2088948	0,51	0,52	3,18	335506
1-Jan	11	1362045	38,3	14,82	5,50	112,8	22,09	25,75	0,97	2121814	0,64	0,63	3,81	357194
1-Jan	12	1646285	46,3	14,82	5,50	112,8	23,63	28,05	0,98	2149618	0,77	0,74	4,51	365426
1-Jan	13	1787009	50,1	14,84	5,50	112,8	24,48	29,29	0,98	2160617	0,83	0,81	4,88	366149
1-Jan	14	1920840	53,7	14,86	5,50	112,8	25,01	30,20	0,99	2165814	0,89	0,87	5,27	364577
1-Jan	15	1853242	51,8	14,87	5,50	112,8	25,10	30,10	0,99	2166534	0,86	0,84	5,06	366134
1-Jan	16	1710127	48,0	14,82	5,50	112,8	24,47	29,07	0,98	2160514	0,79	0,77	4,66	366988
1-Jan	17	1604989	45,2	14,79	5,50	112,8	23,94	28,25	0,98	2154056	0,75	0,72	4,38	366192
1-Jan	18	1584924	44,7	14,79	5,50	112,8	23,75	28,00	0,98	2151367	0,74	0,72	4,33	365678
1-Jan	19	1612311	45,5	14,77	5,50	112,8	23,79	28,12	0,98	2151956	0,75	0,73	4,41	365849
1-Jan	20	1686986	47,7	14,76	5,50	112,8	24,10	28,63	0,98	2156134	0,78	0,76	4,60	366380
1-Jan	21	1679511	47,5	14,75	5,50	112,8	24,25	28,76	0,98	2157948	0,78	0,76	4,58	366738
1-Jan	22	1665291	47,1	14,75	5,50	112,8	24,13	28,60	0,98	2156503	0,77	0,75	4,54	366552
1-Jan	23	1684772	47,7	14,75	5,50	112,8	24,21	28,74	0,98	2157482	0,78	0,76	4,60	366628
1-Jan	24	1688250	47,8	14,75	5,50	112,8	24,26	28,80	0,98	2158118	0,78	0,76	4,60	366719

APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA EM SÉRIE PARA DIA 01 DE JANEIRO – ALTERNATIVA 3

Data	Hora	Carga Térmica Chiller (W)	Vazão mássica AG (kg/s)	Vazão mássica Cond (kg/s)	Operação do Chiller 2
1-Jan	1	1154121	32,6	112,8	Desligado
1-Jan	2	786661	22,6	112,8	Desligado
1-Jan	3	802470	23,0	112,8	Desligado
1-Jan	4	833435	23,9	112,8	Desligado
1-Jan	5	796767	22,8	112,8	Desligado
1-Jan	6	722912	20,9	112,8	Desligado
1-Jan	7	715551	20,7	112,8	Desligado
1-Jan	8	769076	22,2	112,8	Desligado
1-Jan	9	883249	25,2	112,8	Desligado
1-Jan	10	1066635	30,2	112,8	Desligado
1-Jan	11	1362045	38,3	112,8	Desligado
1-Jan	12	1646285	46,3	112,8	Desligado
1-Jan	13	1787009	50,1	112,8	Ligado
1-Jan	14	1920840	53,7	112,8	Ligado
1-Jan	15	1853242	51,8	112,8	Ligado
1-Jan	16	1710127	48,0	112,8	Ligado
1-Jan	17	1604989	45,2	112,8	Desligado
1-Jan	18	1584924	44,7	112,8	Desligado
1-Jan	19	1612311	45,5	112,8	Desligado
1-Jan	20	1686986	47,7	112,8	Ligado
1-Jan	21	1679511	47,5	112,8	Ligado
1-Jan	22	1665291	47,1	112,8	Desligado
1-Jan	23	1684772	47,7	112,8	Ligado
1-Jan	24	1688250	47,8	112,8	Ligado

Data	Vazão mássicaAG (kg/s)	Chiller 1												COP Efetivo	Demanda Efetiva (Wh)
		TeAG (°C)	TmAG (°C)	Vazão mássicaCond (kg/s)	TeCond (°C)	TmCond (°C)	Carga Térmica no Resf,1	Correção Capacidade (cc)	Capacidade Real (CR)	PLR	FPLR				
1-Jan	32,6	14,76	5,5	112,8	22,82	25,86	1154121	0,97	1623643	0,710821537	0,690864574	4,15	277961		
1-Jan	22,6	14,63	5,5	112,8	20,00	22,20	786661	0,94	1571119	0,500700929	0,517407209	3,11	252977		
1-Jan	23,0	14,62	5,5	112,8	19,55	21,79	802470	0,93	1560358	0,51428605	0,527317967	3,17	253211		
1-Jan	23,9	14,64	5,5	112,8	19,73	22,04	833435	0,94	1564732	0,53263774	0,540992316	3,25	256334		
1-Jan	22,8	14,63	5,5	112,8	19,71	21,93	796767	0,94	1564164	0,509388462	0,523724249	3,15	253136		
1-Jan	20,9	14,57	5,5	112,8	19,31	21,36	722912	0,93	1554275	0,465112343	0,492298922	2,96	244333		
1-Jan	20,7	14,54	5,5	112,8	19,08	21,11	715551	0,93	1548238	0,462171149	0,490279209	2,95	242841		
1-Jan	22,2	14,58	5,5	112,8	19,29	21,45	769076	0,93	1553751	0,494980383	0,513287832	3,08	249307		
1-Jan	25,2	14,66	5,5	112,8	19,82	22,24	883249	0,94	1566836	0,563714893	0,564898953	3,40	260158		
1-Jan	30,2	14,76	5,5	112,8	20,75	23,58	1066635	0,95	1587601	0,671853531	0,655438761	3,94	270775		
1-Jan	38,3	14,82	5,5	112,8	22,09	25,56	1362045	0,97	1612578	0,844638296	0,823809341	4,95	275100		
1-Jan	46,3	14,82	5,5	112,8	23,63	27,69	1646285	0,98	1633710	1,007697053	1,009446877	6,07	271361		
1-Jan	50,1	14,84	6,1	112,8	24,48	28,58	1670506	0,97	1615741	1,033894381	1,041693119	6,26	266829		
1-Jan	53,7	14,86	6,7	112,8	25,01	29,11	1670506	0,95	1593273	1,048474105	1,059929621	6,37	262239		
1-Jan	51,8	14,87	6,4	112,8	25,10	29,20	1670506	0,96	1606632	1,039756199	1,049000198	6,30	264971		
1-Jan	48,0	14,82	5,7	112,8	24,47	28,58	1670506	0,98	1632655	1,023183803	1,02842848	6,18	270271		
1-Jan	45,2	14,79	5,5	112,8	23,94	27,92	1604989	0,98	1637082	0,980396112	0,976555498	5,87	273464		
1-Jan	44,7	14,79	5,5	112,8	23,75	27,68	1584924	0,98	1635039	0,969349136	0,963453312	5,79	273718		
1-Jan	45,5	14,77	5,5	112,8	23,79	27,78	1612311	0,98	1635486	0,985829537	0,983043504	5,91	272899		
1-Jan	47,7	14,76	5,6	112,8	24,10	28,21	1670506	0,98	1634752	1,021871237	1,026810626	6,17	270697		
1-Jan	47,5	14,75	5,5	112,8	24,25	28,36	1670506	0,98	1637895	1,019910006	1,024396368	6,16	271335		
1-Jan	47,1	14,75	5,5	112,8	24,13	28,23	1665291	0,98	1638942	1,01607683	1,019688611	6,13	271737		
1-Jan	47,7	14,75	5,6	112,8	24,21	28,32	1670506	0,98	1636300	1,020904319	1,025619889	6,16	271011		
1-Jan	47,8	14,75	5,6	112,8	24,26	28,38	1670506	0,98	1635967	1,021112348	1,025875994	6,17	270943		

Data	Chiller 2											
	Vazão mássicaAG (kg/s)	TmAG (°C)	TsAG (°C)	Vazão mássicaCond (kg/s)	TmCond (°C)	Carga Térmica no Resf, 2	Correção Capacidade (CC)	Capacidade Real (CR)	PLR	FPLR	COP Efetivo	Demand Efetiva (Wh)
1-Jan	32,6	5,50	5,50	112,8	25,86	-	0,88	338683	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	22,6	5,50	5,50	112,8	22,20	-	0,81	313977	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	23,0	5,50	5,50	112,8	21,79	-	0,80	310677	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	23,9	5,50	5,50	112,8	22,04	-	0,81	312156	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	22,8	5,50	5,50	112,8	21,93	-	0,81	311811	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	20,9	5,50	5,50	112,8	21,36	-	0,80	308516	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	20,7	5,50	5,50	112,8	21,11	-	0,79	306782	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	22,2	5,50	5,50	112,8	21,45	-	0,80	308583	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	25,2	5,50	5,50	112,8	22,24	-	0,81	313043	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	30,2	5,50	5,50	112,8	23,58	-	0,83	321037	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	38,3	5,50	5,50	112,8	25,56	-	0,86	333284	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	46,3	5,50	5,50	112,8	27,69	-	0,90	347854	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	50,1	6,11	5,50	112,8	28,58	116503	0,92	355788	0,33	0,34	1,48	78482
1-Jan	53,7	6,72	5,50	112,8	29,11	250335	0,93	360771	0,69	0,69	3,05	82195
1-Jan	51,8	6,42	5,50	112,8	29,20	182736	0,93	361597	0,51	0,51	2,23	81791
1-Jan	48,0	5,72	5,50	112,8	28,58	39621	0,92	355714	0,11	0,14	0,59	66620
1-Jan	45,2	5,50	5,50	112,8	27,92	-	0,91	350554	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	44,7	5,50	5,50	112,8	27,68	-	0,90	348695	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	45,5	5,50	5,50	112,8	27,78	-	0,90	349186	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	47,7	5,59	5,50	112,8	28,21	16481	0,91	352286	0,05	0,08	0,33	49469
1-Jan	47,5	5,55	5,50	112,8	28,36	9005	0,91	353646	0,03	0,06	0,25	36417
1-Jan	47,1	5,50	5,50	112,8	28,23	-	0,91	352538	n,a	n,a	n,a	-
1-Jan	47,7	5,58	5,50	112,8	28,32	14266	0,91	353288	0,04	0,07	0,31	46417
1-Jan	47,8	5,60	5,50	112,8	28,38	17744	0,91	353776	0,05	0,08	0,35	51171