

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
UNIPAMPA — CAMPUS ALEGRETE/RS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROGER ROOS

**VENTILAÇÃO VARIÁVEL COMO ESTRATÉGIA
PARA REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO
EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO**

ALEGRETE - RS

2013

ROGER ROOS

**VENTILAÇÃO VARIÁVEL COMO ESTRATÉGIA
PARA REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO
EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal do Pampa Campus
Alegrete, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Engenheiro
Eletricista.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Márcio Stefanello

ALEGRETE - RS

2013

AUTORIA: Roger Roos

TÍTULO: *Ventilação variável como estratégia para redução do consumo energético em túneis de congelamento*

Trabalho de Conclusão de Curso [TCC].
apresentado como parte das atividades
para obtenção do título de *Engenheiro
Eletricista*, do curso de Engenharia
Elétrica, pela Universidade Federal do
Pampa, de Alegrete/RS.

Os componentes da banca de avaliação, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado.				
	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	Márcio Stefanello	Dr.		UNIPAMPA
2	José Wagner Maciel Kaehler	Dr.		UNIPAMPA
3	Diego Berlezi Ramos	Dr.		UNIPAMPA

Data da aprovação: de de 2013.

AGRADECIMENTOS

Ponto os meus agradecimentos:

- A Deus pelo dom da vida e por ter me cercado de pessoas especiais;
- Aos meus pais Roger e Rejane pelas lições de vida, pelo amor incondicional, pela paciência e fé depositada em mim;
- Aos meus irmãos Reges e Roberta pelo apoio e amor;
- A minha noiva Daniele que sempre esteve ao meu lado em todas as horas, sem medir esforços para que eu concluísse esta jornada. Jamais teria ido tão longe sem seu apoio;
- A minha tia Liége pelas suas palavras de conforto nos momentos de turbulência;
- A minha afilhada Júlia que mesmo sem saber proporcionava períodos de alegria e descontração;
- Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Stefanello pelas oportunidades e ensinamentos a mim compartilhados, além de sua compreensão que tende ao infinito;
- Aos colegas e amigos que fizeram a diferença nesta trajetória;
- A todos os professores do curso, que muito contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.
- A BRF pela grande oportunidade de aprendizado.

*Dedico este trabalho a minha família
e a minha noiva Daniele.*

*A passagem dos séculos me assombra.
Para onde irá correndo minha sombra
Nesse cavalo de eletricidade?!
Caminho, e a mim pergunto, na vertigem:
- Quem sou? Para onde vou? Qual minha
origem?
E parece-me um sonho a realidade.*

Augusto dos Anjos

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso vislumbra demonstrar através de estudo de caso a possibilidade de redução de energia elétrica em túneis de congelamento, utilizando ventilação variável. A pesquisa desenvolvida nesse estudo é do tipo experimental, onde foi realizado o registro de dados antes e após a implantação do sistema, analisou-se e correlacionou-se os dados. A partir da análise das informações observou-se que com a atuação do sistema de ventilação variável foi possível obter redução na demanda energética do túnel, o que representou um ganho anual de até R\$ 45.0000, com uma relação de custo benefício de 0,13 na implantação deste sistema. Nos resultados também aparece melhora na performance do túnel, diminuindo o tempo de congelamento dos produtos mantendo como referência a temperatura máxima exigida pela fiscalização de -18°C .

Palavras-chave: Redução de Energia, Congelamento, Ventilação Variável

ABSTRACT

This work of course conclusion discerns demonstrate through case study the possibility of reduction of electric energy in freezing tunnels, using variable ventilation. The research developed in this study is the experimental type, where it was carried out the record of data before and after the implementation of the system, was analyzed and correlated the data. From the analysis of the information it was observed that with the actions of the variable ventilation system was possible to obtain reduction in energy demand of the tunnel, which represented an annual gain of up to R\$ 45.0000, with a cost benefit ratio of 0.13 in the deployment of this system. The results also appears improvement in the performance of the tunnel, decreasing the time of freezing of the products while keeping as a reference to the maximum temperature required for surveillance of - 18°C.

Keywords: Energy Reduction, Freezing, Variable Ventilation

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Esquema de congelador de placas horizontais de funcionamento descontínuo.....	19
Figura 02 - Esquema demonstrativo sobre o congelamento contínuo	20
Figura 03 - Esquema demonstrativo dos túneis do tipo giro freezer	21
Figura 04 - Esquema demonstrativo sobre o congelamento em leite fluidizado	22
Figura 05 - Esquema de congelador por imersão.....	23
Figura 06 - Congelador criogênico de nitrogênio líquido [A = zona de pré-resfriamento; B = zona de congelamento; C = zona de equilíbrio; D = zona de vitrificação].....	24
Figura 07 - Ilustração da tabela ACFM = actual cubic feet per minute, unidade americana típica para vazão em pressão e temperatura ambiente].....	28
Figura 08 - Gráfico representativo sobre curvas características de dois ventiladores em paralelo	42
Figura 09 – Diagrama de blocos de um sistema ventilação variável.....	33
Figura 10 - Diagrama de blocos de um controlador do tipo PID	35

LISTA DE ANEXOS

Anexo 01 - Representação da planta baixa da BRF - Unidade de Lajeado/RS ...	51
Anexo 02 – Exemplo de tarifa emitida pela AESSUL — tarifação para o subgrupo A3 (69kV)	52
Anexo 03 - Planilha de Avaliação Econômica Padrão (PAEP), utilizada pela BRF para a possível viabilização de projetos.....	53
Anexo 04 – Cálculos térmicos referentes ao túnel 03... ..	54

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 01 - Cálculo da relação entre vazão e rotação [Leis dos Ventiladores]	29
Fórmula 02 - Cálculo da relação entre vazão e rotação [Leis dos Ventiladores]	30
Fórmula 03 - Cálculo da relação entre potência no eixo e rotação	30
Fórmula 04 - Cálculo da vazão em função da velocidade e da área	30
Fórmula 05 - Cálculo da rotação em função da potência no eixo	30
Fórmula 06 - Cálculo da rotação em função da potência no eixo	30
Fórmula 07 - Cálculo da vazão em função da rotação	31
Fórmula 08 - Cálculo da vazão em função da rotação	31
Fórmula 09 - Cálculo da velocidade em função da vazão e da área	31
Fórmula 10 - Cálculo da velocidade em função da vazão e da área	31
Fórmula 11 - Cálculo da velocidade em função da vazão e da área	31
Fórmula 12 - Cálculo da rotação em função da frequência	31
Fórmula 13 - Cálculo do custo unitário evitado de demanda	46
Fórmula 14 - Cálculo do custo unitário evitado de energia	46
Fórmula 15 - Cálculo dos fatores de perdas.....	47
Fórmula 16 - Cálculo do calor sensível antes do congelamento.....	58
Fórmula 18 - Cálculo do calor sensível depois do congelamento	59
Fórmula 19 - Cálculo do calor a absorver do produto	59
Fórmula 20 - Cálculo do calor gerado pelos motores elétricos	59
Fórmula 21 - Cálculo do calor que penetra pelo isolamento	60
Fórmula 22 - Cálculo da vazão mássica de amônia, requerida para o Túnel 03	61
Fórmula 23 - Cálculo da vazão volumétrica de amônia, requerida para o Túnel 03	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	14
3.1.1 Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética	15
3.1.2 Eficiência em túneis de congelamento	16
3.2 CONGELAMENTO / DEFINIÇÕES	17
3.2.1 Métodos de congelamento	18
3.2.2 Normas e padrões de congelamento	24
3.3 MECÂNICA DOS FLUIDOS	26
3.3.1 Camada limite	26
3.3.2 Camada limite térmica	27
3.3.3 Cálculos da velocidade do ar	27
3.3.4 Associação de Ventiladores em paralelo	28
3.4 SISTEMAS DE CONTROLE	32
3.4.1 Controlador PID	33
4 METODOLOGIA	36
4.1 LOCAL DO ESTUDO	36
4.2 CONSOLIDAÇÃO DA PROPOSTA	37
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4.3.1 Consumo energético do túnel 03	44
4.3.2 Análise técnico econômica	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS	51
ANEXOS	54

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de alimentos, os sistemas frigoríficos, constituem-se em uma das etapas do processo produtivo de maior impacto no uso de energia elétrica para o congelamento de produtos.

Os túneis podem ser classificados nos seguintes grupos: circulação forçada de ar, placas, criogênico, imersão e refrigerante líquido.

Dentre eles, destaca-se o congelamento por circulação forçada de ar, denominados túneis de congelamento, caracterizados pela flexibilidade em atender à grande variedade de formas, tamanhos, pesos, embalagens e tempos de resfriamento e congelamento além da utilização de mão de obra reduzida. Sendo a tendência atual a utilização de sistemas de refrigeração por compressão a vapor utilizando amônia.

Os produtos devem permanecer no túnel o tempo necessário para que a temperatura no seu centro térmico seja reduzida até o patamar desejado, sendo então transferido para uma câmara de estocagem para manutenção desta condição até o momento da comercialização (FRASER, 1998; SANTOS, 2005).

A geração de frio é considerada um processo bastante complexo e crítico, em parte por envolver substâncias refrigerantes potencialmente tóxicas, confinadas em dutos sob pressão, além de exigir considerável demanda de energia elétrica para atingir as temperaturas adequadas.

A *Confederação Nacional da Indústria* e a ELETROBRÁS, por meio do *PROCEL Indústria – Programa de Conservação de Energia Elétrica* desenvolvem estreita cooperação, com o objetivo de aumentar o dinamismo das ações de eficiência energética no setor industrial, reconhecendo as empresas que investem em projetos de eficiência energética a fim de economizar recursos e amenizar a pressão sobre o aumento da oferta de energia, estabelecendo um mercado autossustentável e autônomo de eficiência energética no Brasil (ELETROBRÁS, 2009).

Desta forma, a motivação que justifica este trabalho surge justamente da tendência vigente no Brasil em trabalhar a economia dos energéticos combustíveis e eletricidade.

Neste sentido, foi realizado um estudo de caso em um túnel de congelamento da empresa BRF unidade de Lajeado/RS, de forma a encontrar solução técnica para a redução de energia elétrica utilizando variação da velocidade dos ventiladores em função da temperatura de retorno do ar.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Verificar o impacto de um sistema de ventilação variável na performance de um túnel de congelamento, utilizando inversores de frequência e malha de controle PID para controlar a velocidades dos ventiladores.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Reduzir a demanda de energia elétrica no túnel de congelamento;
- b) Verificar se a temperatura de congelamento atende ao padrão exigido pela fiscalização permanecendo no máximo a $-18C^{\circ}$,
- c) Analisar a possibilidade de melhora no processo de congelamento através de ventilação variável.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir, apresentam-se as razões que fundamentam o trabalho proposto, focando sua estruturação em quatro pilares básicos: Eficiência energética, Congelamento/Definições, Mecânica dos Fluidos e Sistemas de Controle (Controle PID).

3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Desde a Revolução Industrial, a sociedade tem usado os recursos energéticos de forma irrestrita e abusiva, o que impulsiona a busca por novas fontes de energia, principalmente a utilização de fontes renováveis para minimizar as consequências deste comportamento.

Torna-se significativo considerar que a

[...] eficiência energética consiste em reduzir perdas e eliminar desperdícios, o que é, atualmente, uma questão crucial para a humanidade, pois as atuais fontes de energia disponíveis são insustentáveis para os padrões de uso atuais (GELLER, 2003 apud Camacho pg. 33)

O contrato de concessão firmado pelas empresas concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica com a *Agência Nacional de Energia Elétrica* (ANEEL) estabelece que as concessionárias devem aplicar anualmente o montante de no mínimo 0,5 % de sua receita operacional líquida no combate ao desperdício de energia elétrica. A Resolução Normativa Nº 300 da ANEEL de fevereiro de 2008, em substituição à Resolução anteriormente citada, estabelece que:

O formato e a metodologia de apresentação dos projetos de eficiência energética, bem como das avaliações técnico-econômicas inicial e final, devem observar as orientações contidas no Manual Para Elaboração do Programa de Eficiência Energética (ANEEL, 2008a, p. 1)

O *Manual Para Elaboração do Programa de Eficiência Energética*, por sua vez, estabelece que a proposta para campanhas de medições deverá ser baseada no Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance (PIMVP), que

fornece uma visão geral das melhores práticas atualmente disponíveis para medir e verificar os resultados de projetos de eficiência energética (ANEEL, 2008).

Assim, sob a perspectiva da aplicação do recurso público em eficiência energética, o Brasil já tem base legal e ferramentas disponíveis para que determinação da energia economizada siga padrões de medição e verificação existentes e internacionalmente aceitos.

No Brasil, o *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica* (PROCEL) editou em 2007 um guia de medição e verificação baseado no PIMVP como uma iniciativa para aproximar o investimento privado de técnicas de M&V (Medição e Verificação). Porém, de maneira geral, a utilização da M&V dentro da estratégia de negócio das organizações ainda é exceção (ELETROBRÁS, 2007).

Ainda assim, o PROCEL atua em diversos setores, tanto do lado da oferta, com ações de eficiência em geração, transmissão e distribuição, como do lado da demanda, junto aos fabricantes de equipamentos e usuários de energia elétrica.

O PROCEL executa também ações de marketing, onde se destacam o *Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia*, com diversas categorias: Transportes, Setor Energético, Imprensa, Micro e Pequenas Empresas e Indústria, e o SELO PROCEL, que premia os equipamentos que apresentaram em sua categoria melhor desempenho energético, servindo de diferencial de mercado.

Portanto, os programas de eficiência energética emergem vigorosamente no mercado e, por decorrência natural, a Gestão da Eficiência Energética de Sistemas Industriais sob Condicionantes Socioambientais Sustentáveis. Esses programas têm a finalidade de controlar e reduzir o consumo energético e a emissão de poluentes, produzindo efeitos positivos, mensuráveis, sobre os custos operacionais, a competitividade da indústria e a qualidade de vida (GODOI, 2008).

3.1.1 Manual do Programa de Eficiência Energética

O Manual do Programa de Eficiência Energética – MPEE - é um guia determinativo de procedimentos dirigido aos concessionários e permissionários de serviço público de distribuição de energia elétrica, para elaboração do Programa de Eficiência Energética – PEE.

O PEE é composto de um projeto ou um conjunto de projetos, correspondente à aplicação de recursos em eficiência energética realizado pelos concessionários e permissionários de distribuição de energia elétrica conforme dispõe a Lei n 9.991, de 24 de julho de 2000.

Define-se no MPEE a estrutura e forma de apresentação, os critérios para avaliação econômica, aprovação e acompanhamento, e os tipos de projetos que podem constar do PEE.

O MPEE também apresenta os procedimentos para contabilização dos custos e os tipos de recursos que podem ser utilizados para elaboração do PEE.

3.1.2 Eficiência em túneis de congelamento

Ao abordar o processo de geração de frio em sistemas frigoríficos percebemos várias etapas e processos passíveis de otimização no uso da energia seja elétrica ou térmica.

Em um ciclo de resfriamento do tipo absorção de amônia, amplamente utilizado na indústria alimentícia, as possibilidades de ganhos em eficiência vão desde os motores elétricos que acionam os compressores de amônia ao método usado para resfriamento do óleo dos compressores.

O uso de torres de resfriamento de óleo no lugar dos tradicionais condensadores permite ao sistema trabalhar com certa margem de reserva, pois as pressões de descarga serão menores. Acarretando em uma conexão direta com os esforços que os motores irão demandar para gerar a mesma quantidade de frio e diminuindo também as pressões envolvidas ao longo das tubulações e válvulas. Isto faz com que o sistema apresente uma boa confiabilidade, não comprometendo a segurança e a continuidade dos processos (CHAGAS, 2009).

Não se pode deixar de citar a importância da integridade do isolamento da tubulação que transporta o frio produzido na sala de máquinas até os túneis, câmaras, antecâmaras e salas de processamento, a fim de reduzir as trocas térmicas com o ambiente e evitar condensações indesejadas, dessa forma estará reduzindo perdas e obtendo ganho energético.

O túnel também apresenta a oportunidade de ganhos no evaporador, que deve permitir boa troca térmica e reduzida perda de carga e no sistema de ventilação com uso de motores com coeficientes de rendimento mais alto para sua

potência e pás que permitam uma vazão ótima e velocidades do ar dentro dos padrões compatíveis (MESQUITA, 2009).

3.2 CONGELAMENTO / DEFINIÇÕES

O congelamento consiste em um processo de remoção de calor para a produção e manutenção de temperaturas abaixo do ponto de congelamento inicial (DELGADO, 2001).

Em relação à utilização de geradores de frio é uma prática utilizada para atender às exigências dos mercados de carne, desde a produção até o armazenamento, passando pela comercialização e o transporte destes alimentos.

O processo de conservação por meio do congelamento é um método relativamente simples e permite conservar o produto de forma similar ao seu estado primitivo, reduzindo ou paralisando a ação de micro-organismos que causam a deterioração mantendo assim, a boa qualidade do produto alimentício a ser comercializado (FENNEMA, 1996).

Cada alimento tem características diferentes, o que exige condições diferenciadas, no congelamento. A massa do produto é uma das principais características a ser observada, assim como a quantidade de água que o alimento contém, pois é a água que congela e não os sólidos. Além disso, a cristalização da água reduz a quantidade de água líquida nos produtos e inibe o crescimento microbiano (CHAPLIN, 2004).

O congelamento de alimentos pode ser esquematizado da seguinte forma: primeiramente há o resfriamento do produto para remoção do calor sensível e redução da temperatura até ao ponto de congelamento; após há a remoção do calor latente de fusão do produto, mudando a água para cristais de gelo e por fim se mantém o resfriamento abaixo do ponto de congelamento e, assim, reduz a temperatura do produto para a temperatura desejada de armazenamento (ZARITZKY, 2006).

Estes processos englobam alterações das propriedades termodinâmicas e envolvem conceitos que explicam os fenômenos físicos de transferência de energia térmica e identificam os elementos físicos, as propriedades e as leis que descrevem os fenômenos térmicos. As principais grandezas envolvidas consistem em:

temperatura (T), pressão (P), densidade (ρ), volume específico (v), calor específico (c), calor específico a volume constante (cv) e calor específico a pressão constante (cp) (MESQUITA, 2009).

A velocidade de congelamento é bastante importante, visto que determina o tamanho dos cristais de gelo que se formam no interior das células e portanto a qualidade e aparência do produto final.

Quanto mais rápida for a velocidade de congelamento, maior a será a nucleação, e o resultado será a formação de um número maior de cristais de gelo, porém de tamanho menor fazendo com que o produto apresente uma aparência mais semelhante à original não congelada (HARTEL, 2001).

Quando o congelamento é lento as moléculas de água que congelam primeiro são as que se encontram entre as fibras musculares, fazendo com que os cristais de gelo cresçam muito, o que causa danos na estrutura da carne e pode comprometer a qualidade final do produto (CHAPLIN, 2004).

3.2.1 Métodos de congelamento

Visto que o processo de congelamento envolve uma série de mudanças físicas e químicas, que podem afetar significativamente a qualidade do produto, vários métodos vem sendo empregados com o objetivo de melhorar a eficiência do congelamento e aumentar a qualidade do produto final.

De conformidade com Roça (2000), existem cinco métodos principais, sendo eles o congelamento em ar imóvel, o congelamento em placas (figura 01), o congelamento com circulação forçada de ar, o congelamento por imersão ou aspersão de líquidos e o congelamento criogênico.

A seguir, se detalha cada um destes métodos, corroborando com as ideias dos autores Chaplin (2004), Roça (2000) e Regand (2003):

- *Congelamento em ar estático*: é considerado o processo menos eficiente, pois como o ar se apresenta imóvel (ou move-se apenas por convecção) o congelamento é lento e a transferência de calor pequena devido à velocidade de resfriamento ser determinada apenas pela espessura do produto e da temperatura do ar. O tipo de equipamento mais simples é a

câmara frigorífica, e devido ao elevado tempo de congelamento é mais indicado para estocagem.

- *Congelamento em placas*: neste método os produtos são acondicionados em bandejas metálicas que são colocadas em contato direto com as placas ocas por onde circula o líquido refrigerante. A temperatura do congelador de placas também varia de -10 à -30°C . A velocidade de congelamento por esse método é ligeiramente maior do que ar imóvel.

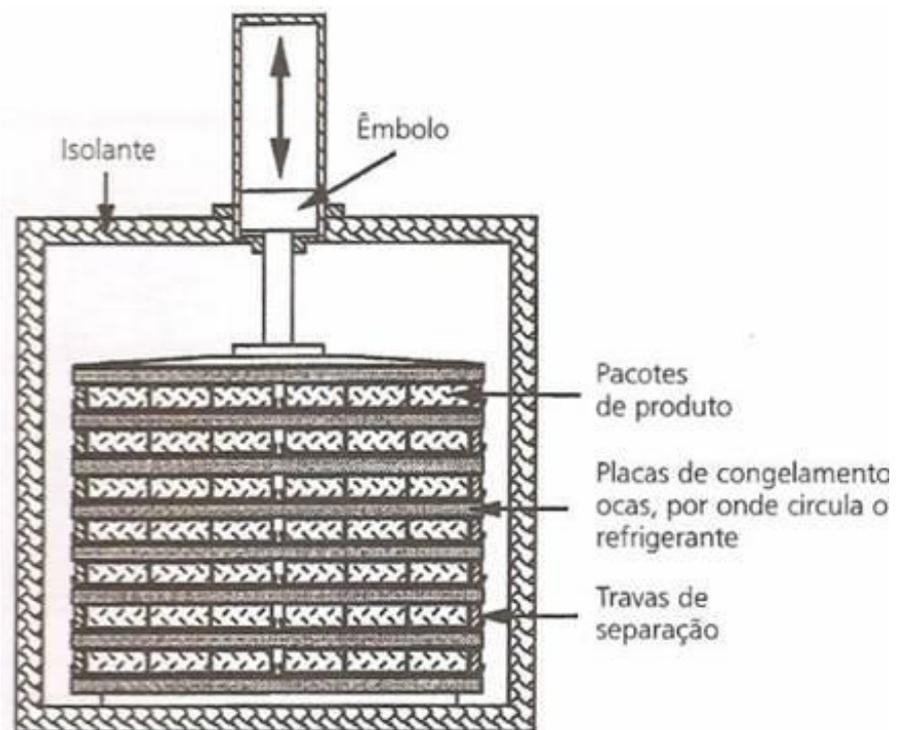


FIGURA 01 - Esquema de congelador de placas horizontais de funcionamento descontínuo. FONTE: http://www8.ufrgs.br/alimentus/objetos/veg_congelados/cong_contato.html, 2013

- *Congelamento em corrente de ar*: é o método mais empregado na indústria de carnes. São utilizados túneis ou salas equipadas com ventiladores. O ar constitui o meio de transferência de calor, mas como seu movimento é rápido, a velocidade que se transfere calor é muito mais veloz do que os congeladores com ar imóvel ou estático. Este método também é conhecido como congelamento em túneis. A velocidade do ar é de 5 a 6 m/s e a temperatura varia entre -35°C e -40°C . É o método mais prático e econômico para a indústria, pois permite atingir uma temperatura de ar mais uniforme ao longo do túnel além de poder alterar a velocidade do ar para variar o coeficiente de calor com a superfície do produto.

Dentre os túneis de congelamento destacam-se os de congelamento contínuo (figura 02), onde os produtos ficam imóveis até atingirem a temperatura desejada, os túneis do tipo giro freezer (figura 03), onde os produtos circulam pelo interior do túnel em uma esteira ou corrente em espiral e o congelamento em leito fluidizado. O congelamento em leito fluidizado envolve um processo em que o ar frio é forçado para cima sob o produto a uma velocidade suficientemente elevada para "fluidificá-lo", conforme mostrado (figura 04). O ar atua tanto como o meio de resfriamento como meio de transporte, sendo que os produtos adequados para o congelamento em leito fluidizado são produtos pequenos e de tamanho uniforme e que não sejam propensos a sofrer danos causados pela elevada velocidade do ar. Os exemplos mais comuns de produtos congelados em leito fluidizado são vegetais como ervilhas, sementes de milho e cenoura em cubos. A alta velocidade do ar e o tamanho pequeno dos produtos estão associados ao baixo tempo de congelamento, tipicamente menor que 10 min.

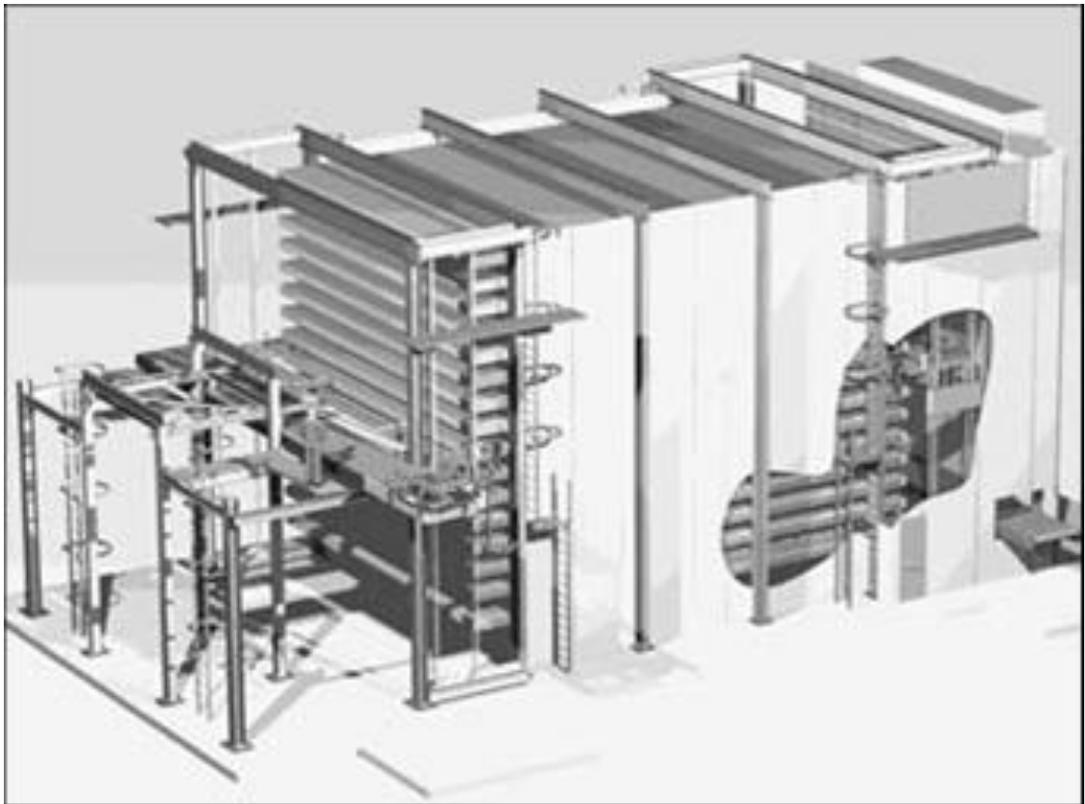


FIGURA 02 - Esquema demonstrativo sobre o congelamento contínuo
FONTE: IBEX Technologies Ltd., New Zealand, 2012

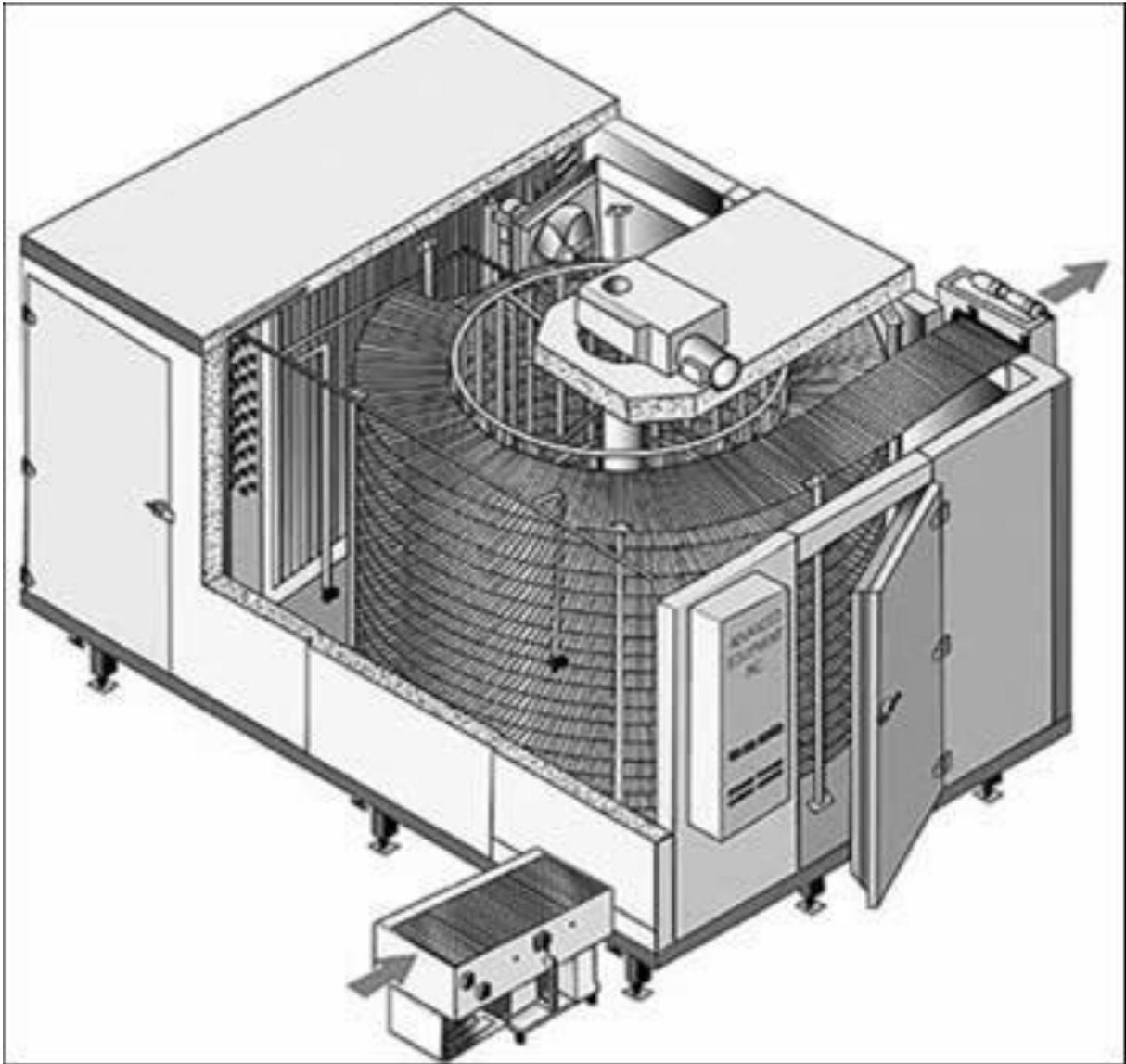


FIGURA 03 - Esquema demonstrativo dos túneis do tipo giro freezer
FONTE: Advanced Equipment Inc., Canadá, 2012

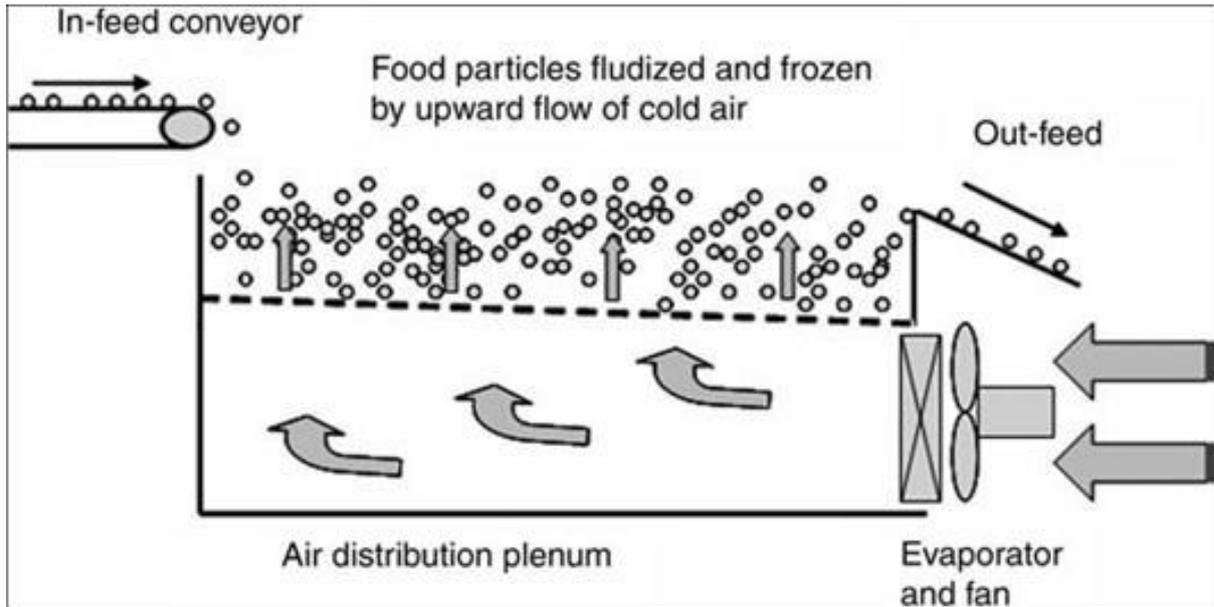


FIGURA 04 - Esquema demonstrativo sobre o congelamento em leito fluidizado
 FONTE: Handbook of Frozen Food, 2012

- *Imersão e aspersão de líquidos*: na indústria de carnes é um método pouco utilizado (figura 5). Os produtos a serem congelados são acondicionados em embalagens plásticas impermeáveis e imersos em líquidos como cloreto de sódio, glicerina e glicóis (propilenoglicol). Esses líquidos são resfriados por um evaporador com refrigerante. O que resulta em maior transferência de calor e os tempos de congelamento são mais curtos que os demais métodos.

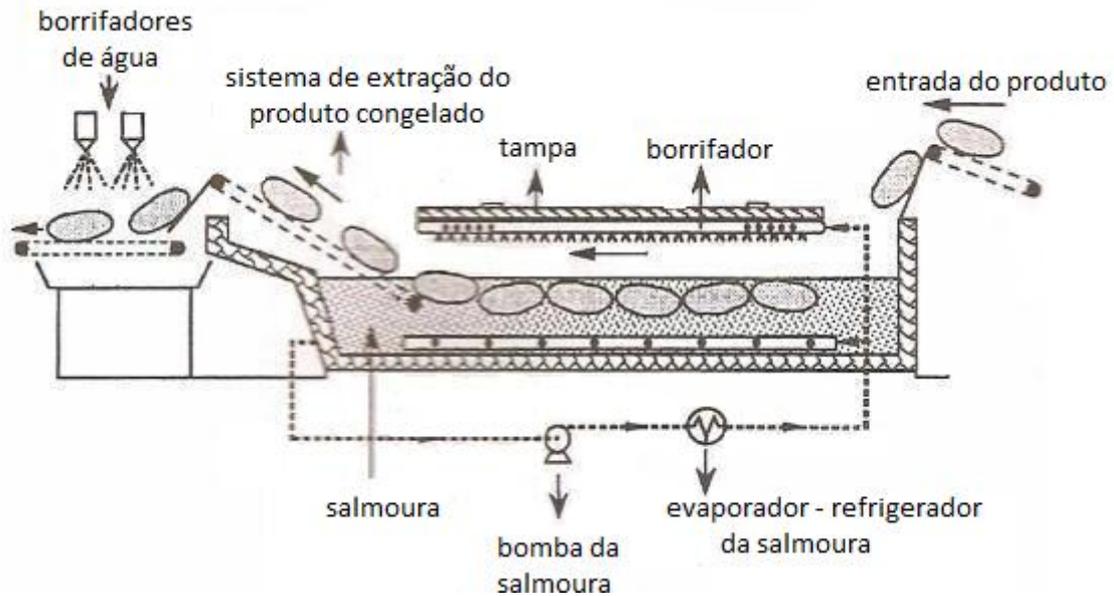


FIGURA 05 - Esquema de congelador por imersão

FONTE: Disponível em: http://www8.ufrgs.br/alimentus/objetos/veg_congelados/cong_imersao.html, 2012

- *Congelamento criogênico*: no congelamento criogênico são utilizados nitrogênio em forma líquida ou gasosa, dióxido de carbono e ocasionalmente o óxido nitroso líquido (figura 6). Os produtos são então imersos nessas substâncias. Este método exige baixo investimento em maquinário, visto que necessita apenas de um tanque de imersão e um sistema para imergir os produtos. Porém o custo do nitrogênio, principalmente, é bastante elevado, fazendo com que o congelamento criogênico seja viável apenas para produção em baixa escala.

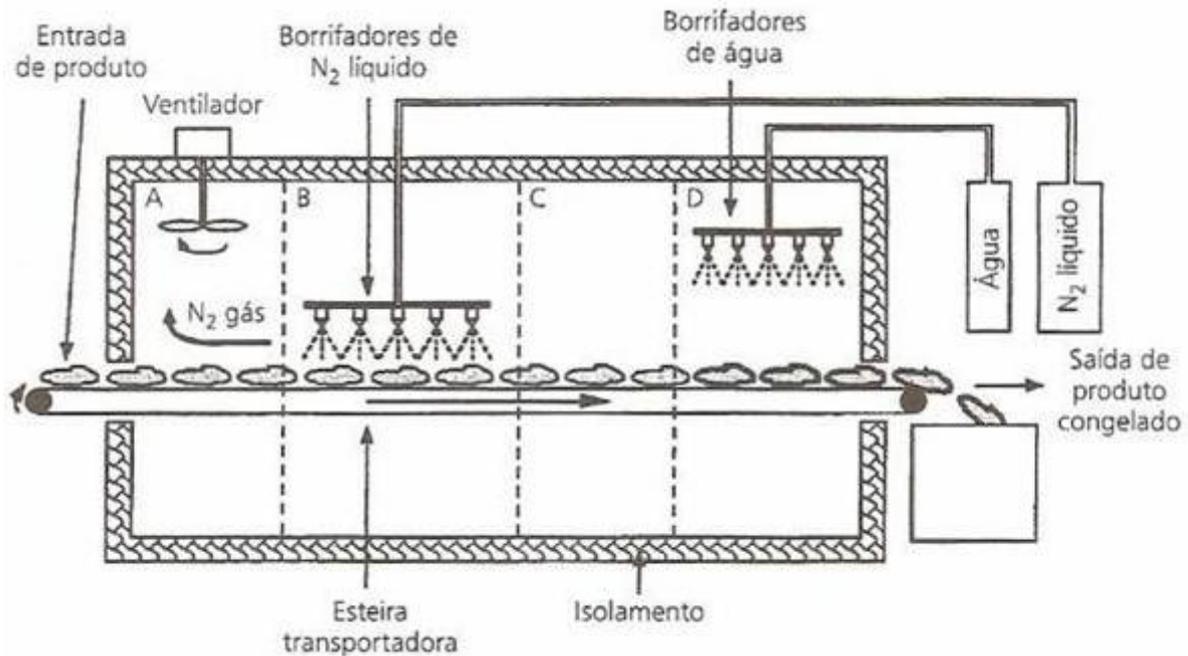


FIGURA 06 - Congelador criogênico de nitrogênio líquido [A = zona de pré-resfriamento; B = zona de congelamento; C = zona de equilíbrio; D = zona de vitrificação]

FONTE: Disponível em: http://www8.ufrgs.br/alimentus/objetos/veg_congelados/cong_criogenico.html

3.2.2 Normas e padrões de congelamento

A elaboração e a publicação da legislação brasileira na área de alimentos visam o constante aperfeiçoamento das ações de controle sanitário a fim de proteger a saúde da população.

No que tange os produtos industrializados congelados a Portaria CVS-6/99, de 10.03.99, dispõe que os produtos devem constar em suas embalagens originais as informações do fornecedor e para produtos manipulados e/ou embalagens de produtos industrializados abertos, deve-se seguir a temperatura e tempo máximo de armazenamento conforme valores especificados.

— 0 a -5°C em 10 dias;	} Tempo máximo de armazenamento em função da temperatura
— -5 a -10°C em 20 dias;	
— -10 a -18°C em 30 dias;	
— < -18°C em 90 dias.	

No caso do frango congelado, inteiro, carcaças, cortes, recortes ou miúdos, processado em estabelecimentos industriais, a legislação vigente Portaria nº. 210 de

10 de outubro de 1998 define as normas para as instalações frigoríficas, devendo ser constituídos de antecâmara(s), câmara(s) de resfriamento, câmara(s) ou túnel de congelamento rápido, câmara(s) de estocagem e local para instalação do equipamento produtor de frio.

Esta Portaria prevê também o armazenamento logo após o congelamento a temperatura máxima de -18°C , não devendo apresentar na intimidade da massa muscular, temperatura superior a -12°C tolerando-se uma variação de até 2°C , medidos na intimidade dos mesmos (BRASIL, 1998).

São consideradas câmaras frigoríficas quaisquer espaços de armazenagem, que tenham as suas condições internas controladas por um sistema de refrigeração. As características construtivas das câmaras frigoríficas influem diretamente na capacidade de refrigeração, ou seja, tem responsabilidade direta no aumento ou redução do consumo de energia elétrica da instalação e da capacidade de congelamento (CHAGAS, 2009).

Neste sentido, a Portaria nº. 210/1998, trata sobre as instalações frigoríficas, abaixo apresenta-se algumas das características consideradas mais significativas:

- Antecâmara com largura mínima de 2,00 m ;
- Paredes de fácil higienização, resistentes aos impactos;
- Sistema de iluminação do tipo "luz fria", com protetores à prova de estilhaçamento;
- Portas com largura mínima de 1,20 m de vão livre, de superfície lisa e de material não oxidável;
- Dispor de termômetro e, quando exigidos, de outros aparelhos de mensuração e registro;

As condições de temperatura no transporte e comercialização dos produtos congelados estão previstas na legislação Resolução CISA/MA/MS nº 10, de 31 de julho de 1984, com temperatura máxima de -8°C para a comercialização e transporte de carne de aves congeladas. Na armazenagem de alimentos destinados à formação de estoques, serão exigidas as mesmas temperaturas em que são conservados na empresa produtora.

3.3 MECÂNICA DOS FLUIDOS

3.3.1 Camada limite

Quando trabalhamos com túneis de congelamento, o conceito de camada limite é bastante importante para analisarmos de forma correta a relação entre a velocidade do ar e a troca térmica.

Para Haliday, Resnick, 2012, a camada limite consiste em uma camada relativamente fina existente entre um corpo imóvel e um fluido que escoar através do mesmo. Este corpo atua como um obstáculo ao escoamento do fluido, ocasionando mudanças de direção e aceleração em torno do objeto.

Um efeito deste conceito é que na superfície de um objeto sólido por onde escoar um fluido, as moléculas do fluido tendem a ser arrastadas pela superfície durante o movimento. Isto faz com que a velocidade varie de um valor máximo na parte externa da camada até um valor igual a zero na superfície do corpo (HALIDAY, RESNICK, 2012).

Isto explica por que as pás de um ventilador mesmo em movimento acumulam poeira em sua superfície, pois a velocidade do ar em relação a superfície da pá é igual a zero.

No caso de velocidades elevadas do fluido, as perdas de energia tornam-se suficientemente grandes para que o fluido possa acompanhar o contorno do objeto. (BRANCAZIO, 1992).

O resultado é que a camada tende a se separar da superfície, havendo mínimas trocas térmicas.

Porém, se o fluido escoar lentamente, as perdas por atrito são pequenas e o fluido na camada limite poderá acelerar-se permanecendo em contato com a superfície do objeto (BRANCAZIO, 1992).

Este contato favorece a troca térmica entre o fluido e o corpo, resultando em menores tempos de congelamento para velocidades de escoamento mais baixas, exatamente como ocorre na utilização de sistema de ventilação variável.

3.3.2 Camada limite térmica

A camada limite térmica sempre se desenvolve quando há diferença de temperatura entre um fluido sobre uma superfície. É caracterizada pela região onde gradientes de temperaturas estão presentes no escoamento (é a região onde o fluido se aquece ou se resfria). Estes gradientes resultam de um processo de transferência de calor entre o fluido e a superfície (SHAMES, 2003).

É fundamental determinar se a camada limite é laminar ou turbulenta, pois o atrito superficial e as taxas de transferência por convecção dependem fortemente das condições na camada.

Na camada limite laminar, o movimento do fluido é altamente ordenado, as velocidades são elevadas e as trocas térmicas são reduzidas, pois o fluido escoava apenas próximo da superfície do objeto (FOX, MCDONALD, 2001).

Na camada limite turbulenta o movimento do fluido é altamente irregular, sendo caracterizado por flutuações de velocidade. Essas flutuações melhoram a transferência de momento, energia e massa e portanto aumentam o atrito na superfície, bem como as taxas de transferência de calor por convecção (LIENHARD, 2012).

Neste sentido, a contribuição do sistema de ventilação variável é justamente permitir que o ar circule dentro do túnel a velocidades mais baixas, favorecendo assim o escoamento turbulento e aumentando as trocas térmicas entre o ar e os produtos. O calor que é conduzido para o interior desta camada é "arrastado" na direção do escoamento, sendo transferido para o fluido em movimento no exterior da camada limite.

3.3.3 Cálculos das velocidades do ar

As Leis dos ventiladores são decorrentes da aplicação da teoria da similaridade às máquinas de fluxo.

A Primeira Lei dos Ventiladores está diretamente relacionada com os cálculos da velocidade do ar, pois afirma que a vazão do ar que se move através das pás depende da velocidade de rotação do ventilador.

Com o aumento da velocidade de rotação, a vazão de ar aumenta de acordo com a taxa indicada no quadro que segue (Figura 10):

Relação entre rotação e vazão de ar	
Rotação (rpm)	Vazão (ACFM)
800	16000
900	18000
1000	20000
1100	22000
1200	24000

FIGURA 07 - Ilustração da tabela ACFM = *actual cubic feet per minute*, unidade americana típica para vazão em pressão e temperatura ambiente]
 FONTE: ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/maquinas_de_fluxo, 2013

É importante reconhecer que uma diminuição de 10% na velocidade do ventilador tem como resultado uma diminuição de 10% na taxa de fluxo de ar (vazão) através do sistema de ventilação (relação linear).

Esta relação é expressa pela Primeira Lei do Ventilador, descrita as seguir:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad 01$$

onde:

Q_1 e Q_2 = vazões;

n_1 e n_2 = rotações em rpm.

3.3.4 Associação de ventiladores em paralelo

Quando dois ou mais ventiladores são associados em paralelo, a pressão total produzida pelos ventiladores é única e as suas vazões individuais se somam, como se visualiza a seguir.

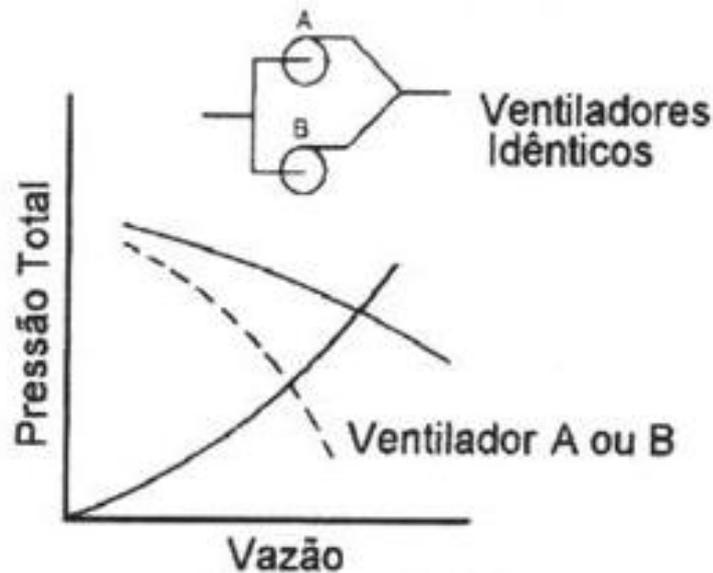


FIGURA 11 - Gráfico representativo sobre curvas características de dois ventiladores em paralelo

FONTE: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120>, 2013

Em concordância com as Leis dos Ventiladores, as expressões abaixo nos permitem encontrar as velocidades do ar em função da vazão do sistema de ventilação.

Tem-se:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad 02$$

Onde:

Q_1 e Q_2 = são as vazões dadas em m^3/s ;

n_1 e n_2 = são as rotações dos ventiladores dadas em rpm (rotações por minuto).

Tem-se:

$$\frac{P_{eixo1}}{P_{eixo2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad 03$$

onde:

P_{eixo1} e P_{eixo2} = são as potências nos eixos dadas em Watts e fornecidas pelo fabricante ($P_{eixo1} = 152000W$, $P_{eixo2} = 140000W$ e $P_{eixo3} = 50000W$);

Os valores das potências no eixo são fornecidos pelo fabricante.

n_1 e n_2 = são as rotações dos ventiladores dadas em RPM.

onde:

$$n_1 = 1755 \text{ rpm a } 60 \text{ Hz.}$$

Vale mencionar, que os dados do túnel 03 (local do experimento) foram utilizados como exemplo, neste capítulo, para encontrar por meio de cálculos a rotação dos motores onde se obtém a velocidade do ar mais efetiva para o congelamento dos produtos.

Sabendo que o sistema conta com nove ventiladores com área total de 11m² e vazão de 460.000 m³/h (dados fornecidos pelo fabricante – RECRUSUL), isto nos permite encontrar a velocidade do ar na rotação nominal dos ventiladores (frequência de 60 Hz).

Sendo a vazão de 460.000 m³/h igual a 127,777 m³/s e a área total A=11m²:

$$Q_1 = v_1 \cdot A \text{ ou } v_1 = \frac{Q_1}{A} = \frac{127,777}{11} \quad 04$$

$$\therefore v_1 = 11,62 \text{ m/s}$$

Portanto, v_1 é a velocidade nas condições nominais de operação.

Tem-se:

$$\frac{P_{eixo1}}{P_{eixo2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \therefore \frac{152000}{140000} = \left(\frac{1755}{n_2}\right)^3 \quad 05$$

Logo:

$$n_2 = 1707 \text{ rpm}$$

Assim:

$$\frac{P_{eixo1}}{P_{eixo3}} = \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^3 \therefore \frac{152000}{50000} = \left(\frac{1755}{n_3}\right)^3 \quad 06$$

$$\therefore n_3 = 1211 \text{ rpm}$$

Sabendo os valores das rotações dos ventiladores para cada potência, nos é permitido encontrar as vazões e velocidades correspondentes.

Tem-se:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \rightarrow Q_2 = \frac{Q_1 \cdot n_2}{n_1} = \frac{127,777 \cdot 1707}{1755} \quad 07$$

$$\therefore Q_2 = 124,318 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{n_1}{n_3} \rightarrow Q_3 = \frac{Q_1 \cdot n_3}{n_1} = \frac{127,777 \cdot 1211}{1755} \quad 08$$

$$\therefore Q_3 = 88,205 \text{ m}^3/\text{s}$$

Logo as velocidades para cada vazão são:

$$Q_1 = v_1 \cdot A \text{ ou } v_1 = \frac{Q_1}{A} = \frac{127,777}{11} \quad 09$$

$$\therefore v_1 = 11,62 \text{ m/s}$$

$$Q_2 = v_2 \cdot A \text{ ou } v_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{124,318}{11} \quad 10$$

$$\therefore v_2 = 11,3 \text{ m/s}$$

$$Q_3 = v_3 \cdot A \text{ ou } v_3 = \frac{Q_3}{A} = \frac{88,205}{11} \quad 11$$

$$\therefore v_3 = 8,02 \text{ m/s}$$

De posse das rotações podemos determinar qual a frequência que os inversores estão modulando os ventiladores através da equação:

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \rightarrow f = \frac{n \cdot P}{120} \quad 12$$

onde:

P é o número de polos dos motores, sendo $P = 4$;

Para a frequência de 60Hz os dados de placa dos motores informam que a rotação nominal é $n_1 = 1755 \text{ rpm}$.

Para as demais rotações obtemos os seguintes valores:

$$n_2 = 1707 \text{ rpm} \therefore f = 56,9 \text{ Hz}$$

$$n_3 = 1211 \text{ rpm} \therefore f = 40,36 \text{ Hz}$$

Com os cálculos realizados foi possível chegar a tabela a seguir, que demonstra a diferença entre o sistema de ventilação variável e contínua em comparação aos valores trazidos pela literatura como referência na otimização do congelamento.

	Valores de Referência	Ventilação Variável	Ventilação Contínua
Velocidade	5 a 6 m/s	8,02 m/s	11,62 m/s
Frequência	30 Hz	40 Hz	60 Hz
Rotação	906 rpm	1211 rpm	1755 rpm

3.4 SISTEMAS DE CONTROLE

Os sistemas de controle permitem o acionamento e o monitoramento de grandes equipamentos, sendo capazes de comandar várias aplicações sem a intervenção humana. Estes consistem em subsistemas e processos reunidos com o propósito de controlar as saídas dos processos (NISE, 2000).

Por exemplo, num sistema de refrigeração subsistemas chamados válvulas de expansão e atuadores de válvulas de expansão são usadas para regular a temperatura de uma sala controlando a saída de frio do refrigerador. Outros subsistemas, como termostatos, que se comportam como sensores, medem a temperatura do ambiente. Na sua forma mais simples, um sistema de controle fornece uma saída ou resposta para uma dada entrada ou estímulo (NISE, 2000).

A maioria desses sistemas utiliza como fonte de energia a eletricidade e como transmissor um fluido pressurizado, tais como óleo ou ar. Um controlador

automático compara o valor real da grandeza de saída com a grandeza de referência, determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. Neste caso a ação de controle é o sinal produzido pelo controlador (OGATA 2000).

A representação que segue (figura 09) ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle que foi utilizado na implantação da ventilação variável, composto por um controlador PID, um atuador (inversores de frequência), um processo a controlar (velocidade dos motores) e um sensor:

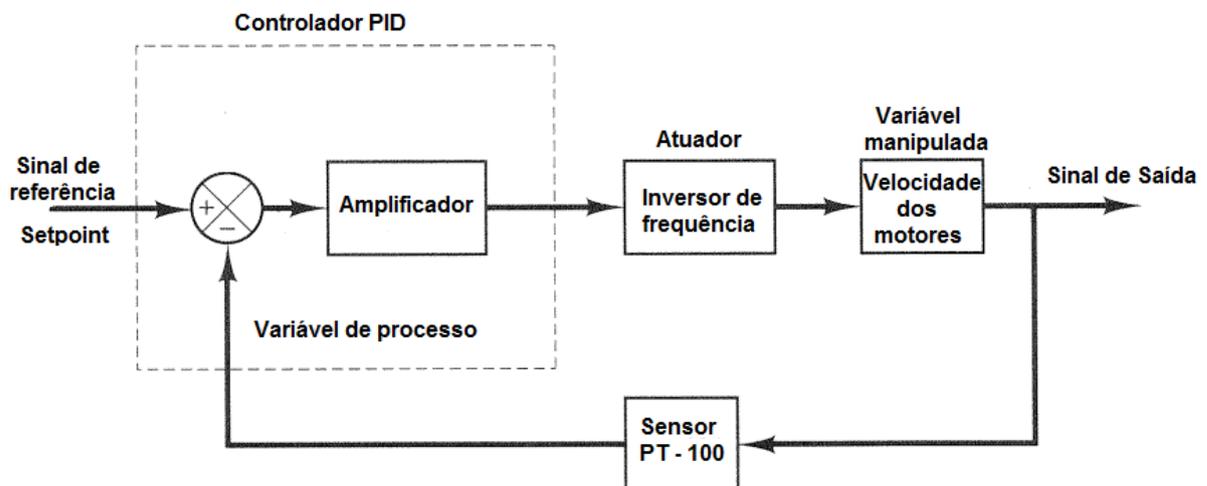


Figura 09 – Diagrama de blocos do sistema utilizado

A variável de processo PV é o sinal proveniente do sensor de temperatura, o valor de Setpoint é de -35°C (temperatura inicial do ar) e a variável manipulada é a velocidade dos motores.

3.4.1 Controlador PID

O Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é considerado o controlador mais comumente usado. Cerca de 90 a 95% de todos os problemas de controle são resolvidos por este controlador. É um componente essencial em todos os sistemas distribuídos para controle de processo (NISE, 2000).

Inclusive sistemas especializados utilizam em suas aplicações o controle PID, devido à facilidade de implementação, baixo custo e versatilidade, além da capacidade de poder alterar os comportamentos transitórios e de regime permanente dos processos sob controle.

Com a evolução da tecnologia os controladores PID hoje utilizam sistemas eletrônicos e microprocessadores em substituição aos relés, motores elétricos síncronos e sistemas pneumáticos ou hidráulicos anteriormente empregados (ASTRÖN; HÄGGLUND, 1996).

De acordo com Novus 2003, a técnica de controle PID consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo. Este valor de atuação sobre o processo é transformado em um sinal adequado ao atuador utilizado (válvula, motor, relé), e deve garantir um controle estável e preciso.

De forma sintetizada, o PID pode ser descrito em três ações:

- **P** - CORREÇÃO PROPORCIONAL AO ERRO: A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado;
- **I** - CORREÇÃO PROPORCIONAL AO PRODUTO ERRO x TEMPO: Erros pequenos, mas que existem há muito tempo requerem correção mais intensa;
- **D** - CORREÇÃO PROPORCIONAL À TAXA DE VARIAÇÃO DO ERRO: Se o erro está variando muito rápido, esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações.

Segundo Nise, a lei de controle básica do PID é composta pelos termos:

$$u(t) = up(t) + ui(t) + ud(t)$$

Cada um dos termos do lado direito da equação são individualmente associados a cada um dos tipos de ações do controlador.

- A *ação proporcional* age proporcionalmente ao erro entre a entrada e a saída do sistema.
- A *ação integral* age proporcionalmente à integral do erro do sistema, garantindo um erro igual a zero em regime permanente para entradas

em degrau, quando o sistema em malha fechada for internamente estável e rejeitar perturbações na entrada da planta iguais ao degrau.

- A *ação derivativa* age proporcionalmente à derivada do erro do sistema e é responsável por melhorar o seu desempenho.

Em nível de blocos, o controlador PID (figura 09). Nesta representação observa-se que o sinal de erro $e(t)$ é utilizado como entrada em três blocos distintos.

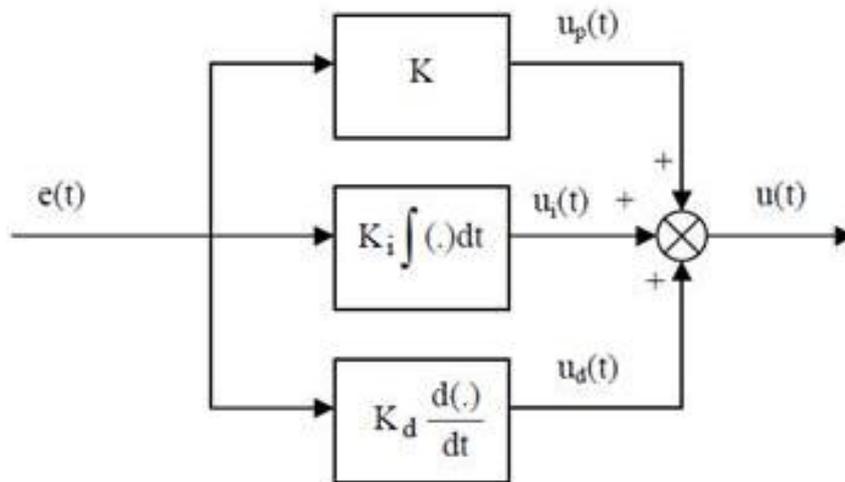


FIGURA 09 - Diagrama de blocos de um controlador do tipo PID

FONTE: Sistemas de Controle, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2009

De acordo com Novus, os principais parâmetros do controlador PID são listados a seguir:

- *PV (Process Variable* ou *variável de processo*): Variável que é controlada no processo, como temperatura, pressão, umidade;
- *SV* ou *SP (Setpoint)*: Valor desejado para a variável de processo (referência);
- *MV* ou *CV (Variável Manipulada* ou *Variável de Controle)*: Variável sobre a qual o controlador atua para controlar o processo, como posição de uma válvula, tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, etc.;
- *Erro* ou *Desvio*: Diferença entre SV e PV. SV-PV para ação reversa e PV-SV para ação direta;
- *Ação de Controle*: *Pode ser reversa* ou *direta*: Define genericamente a atuação aplicada à MV na ocorrência de variações da PV;

- *Ação Reversa*: Se PV aumenta, MV diminui. Tipicamente utilizada em controles de aquecimento;
- *Ação Direta*: Se PV aumenta, MV aumenta. Tipicamente utilizada em controles de refrigeração (NOVUS, 2003)

4 METODOLOGIA

O trabalho de pesquisa mencionado foi implementado durante o Estágio de Final de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa - Campus Alegrete/RS, sendo realizado na Empresa BRF, na cidade de Lajeado/RS, no período entre o mês de Ago/2012 até Fev/2013, com carga horária de 6 horas diárias.

4.1 LOCAL DO ESTUDO

A Empresa BRF, unidade de Lajeado/RS, foi criada a partir da associação entre as empresas Perdigão e Sadia, anunciada em 19 de maio de 2009. A empresa tornou-se uma das maiores do setor alimentício, reforçando a posição do país como potência no agronegócio e atualmente tem importante participação no beneficiamento dos segmentos de carnes, alimentos industrializados e lácteos, com marcas como Perdigão, Sadia, Batavo, Elegê, Qualy, entre outras.

A empresa está situada na R. Carlos Spohr Filho, 2836, Lajeado/RS e conta com aproximadamente 3.300 colaboradores (BRF – RECURSOS HUMANOS, 2013), cujo horário de expediente e de funcionamento se configura das segundas-feiras à sábados, abatendo aproximadamente 480.000 aves/dias utilizando 3 linhas de produção em dois turnos de trabalho.

A planta da empresa BRF, (Anexo 01), possui uma subestação de energia própria, alimentada em 69 kV, fazendo parte, de acordo com a resolução nº 1.280 da ANEEL, da tarifa horo-sazonal azul, subgrupo A3 – Indústria. A partir disto estão estabelecidas as tarifas de acordo com a concessionária AESSUL, como consta no Anexo 02.

A empresa atualmente possui 05 túneis de congelamento contínuo, sendo que com exceção do túnel construído mais recentemente, chamado de IBEX devido ao nome do fabricante, todos os outros são referenciados por um número.

O túnel de congelamento contínuo 03, onde foram realizados os estudos, possui as seguintes características construtivas:

- Capacidade para 1.000.000 Kcal /h;
- Superfície térmica de 10.920 m²;
- Sistema de ventilação composto por 9 ventiladores de 15 cv (11KW), 380 V, com diâmetro de 1.250mm cada;
- Vazão aproximada de 460.000 m³/h;
- Dimensões: 26,8m de comprimento por 8,5 m de largura por 10 m de altura;
- Capacidade para até 5.670 caixas ou 62.370 kg.

É importante ressaltar que o túnel de congelamento 03 possui dois evaporadores isolados por problemas de vazamento de amônia, o que corresponde aproximadamente 7,6 % de redução na capacidade em carga térmica. Os cálculos térmicos referentes ao túnel 03 se encontram no anexo 04.

4.2 CONSOLIDAÇÃO DA PROPOSTA

As atividades que compuseram a proposta do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), foram baseadas nos dados obtidos através de um analisador de grandezas instalado junto ao quadro elétrico dos ventiladores do túnel de congelamento contínuo 03.

A pesquisa e análise dos dados foram divididas em quatro fases distintas, descritas como seguem:

- *Primeira fase:* com o auxílio de um analisador de grandezas elétricas da marca EMBRASUL, modelo ANL6000, foi realizado o levantamento da demanda energética do sistema antigo que utilizava ventilação contínua no túnel 03.

Quando o túnel era ligado, os ventiladores que não possuíam inversores de frequência ou qualquer outro controle de velocidade, permaneciam durante o regime de trabalho do túnel em 100% da sua rotação nominal, isto significa dizer que a

tensão de trabalho de 380V e a frequência de 60 Hz os ventiladores mantinham uma rotação de 1755 rpm (dados de placa dos motores).

O analisador de grandezas gera arquivos ".xls", o que permite, além de usar o software do próprio analisador, utilizar o MS Excel para tratar os dados. Com isto foi possível gerar os gráficos 01, 02 e 03 com o comportamento da demanda energética do túnel.

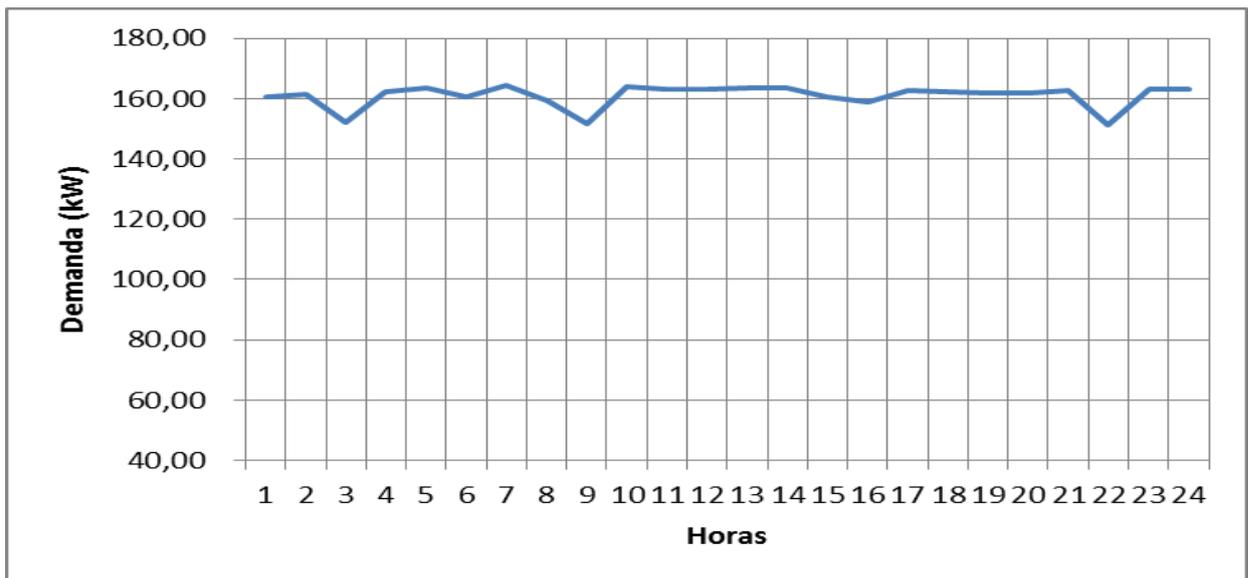


Gráfico 01 - Curva da demanda de energia elétrica sem ventilação variável: Túnel Contínuo 03 [em: 26/Out/2012]

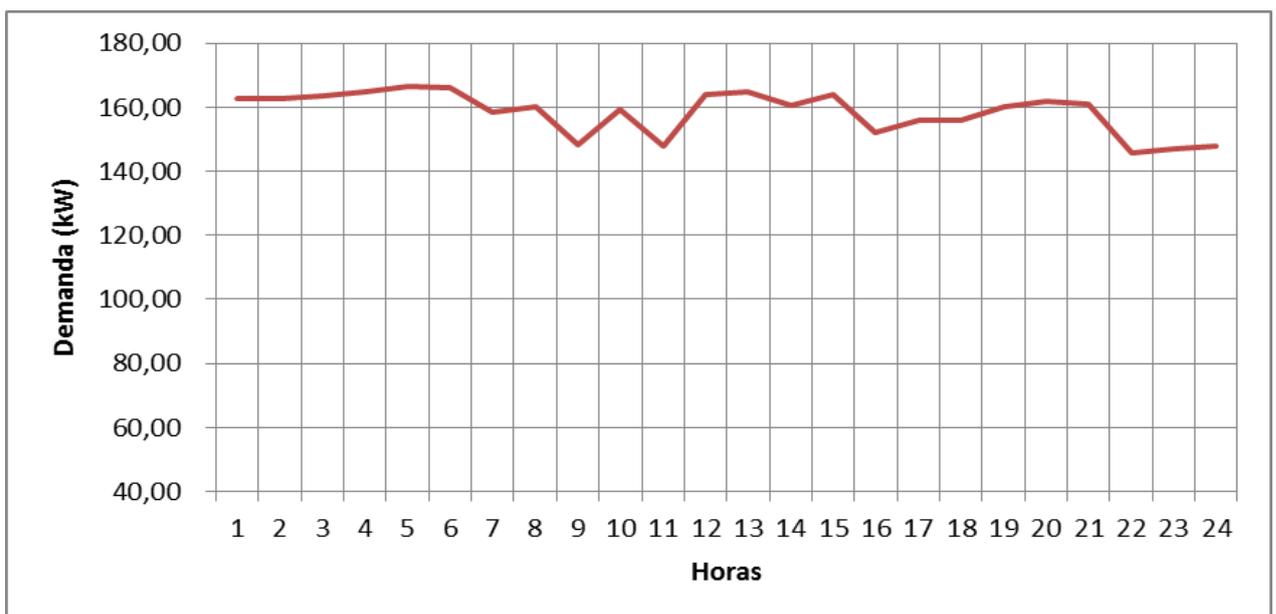


Gráfico 02 - Curva da demanda de energia elétrica sem ventilação variável: Túnel Contínuo 03 [em: 27/Out/2012]

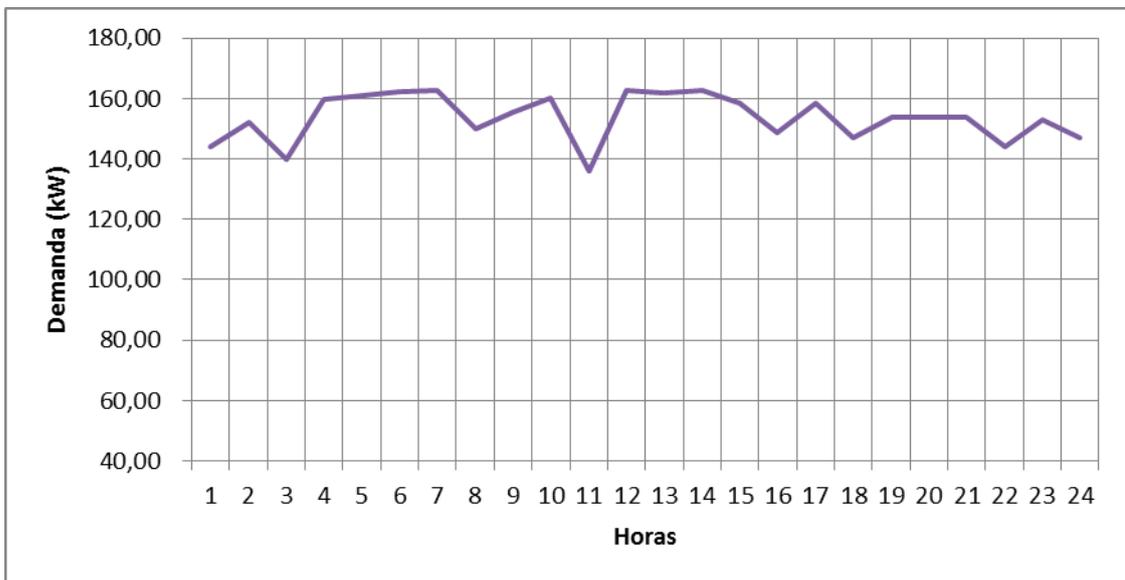


Gráfico 03 - Curva da demanda de energia elétrica sem ventilação variável: Túnel Contínuo 03 [em: 28/Out/2012]

- *Segunda fase*: foi instalado um sensor de temperatura do tipo PT-100 na parede oposta a dos ventiladores do túnel.

O sinal deste sensor é então enviado a um CLP programado com uma malha de controle PID. O CLP, por sua vez, envia um sinal analógico a três inversores de frequência ligados em cascata e que fazem a modulação da velocidade dos motores.

Observa-se que a temperatura registrada pelo sensor é a temperatura que passou pelos produtos e retirou o calor dos mesmos, retornando aos ventiladores com uma temperatura superior a inicial para recomençar o processo, a malha de controle do CLP que é do tipo PID e teve o seu valor de *setpoint* fixado em -35°C que é a temperatura inicial do ar que é soprado pelos ventiladores (temperatura de referência).

O valor registrado pelo sensor de temperatura é o parâmetro PV (variável de processo). Sendo esta temperatura diretamente proporcional à carga térmica do túnel, ou seja, a quantidade de produtos em seu interior.

Através do controle PID, a velocidade dos ventiladores é variada de acordo com a temperatura registrada pelo sensor, que é maior quando há mais produtos no interior do túnel e diminui ao longo do tempo com o resfriamento dos mesmos.

- *Terceira fase:* foi realizado o levantamento da demanda energética do novo sistema em funcionamento (ventilação variável).

Para isso o mesmo analisador de grandezas ANL6000 foi utilizado, o que proporcionou a geração dos gráficos 04, 05 e 06 com as características da demanda energética do novo sistema implantado e a planilha 01 com o comparativo de consumo entre os dois sistemas.

Data	Demanda	Redução KW	Redução %
25/out	168,72	26,65	15,8
26/out			
27/out			
	Implantação do sistema		
31/out	142,06		
01/nov			
02/nov			

Legenda:

	Ventilação contínua
	Ventilação variável

Planilha 01 - Quadro representativo sobre a demanda média diária [kW]

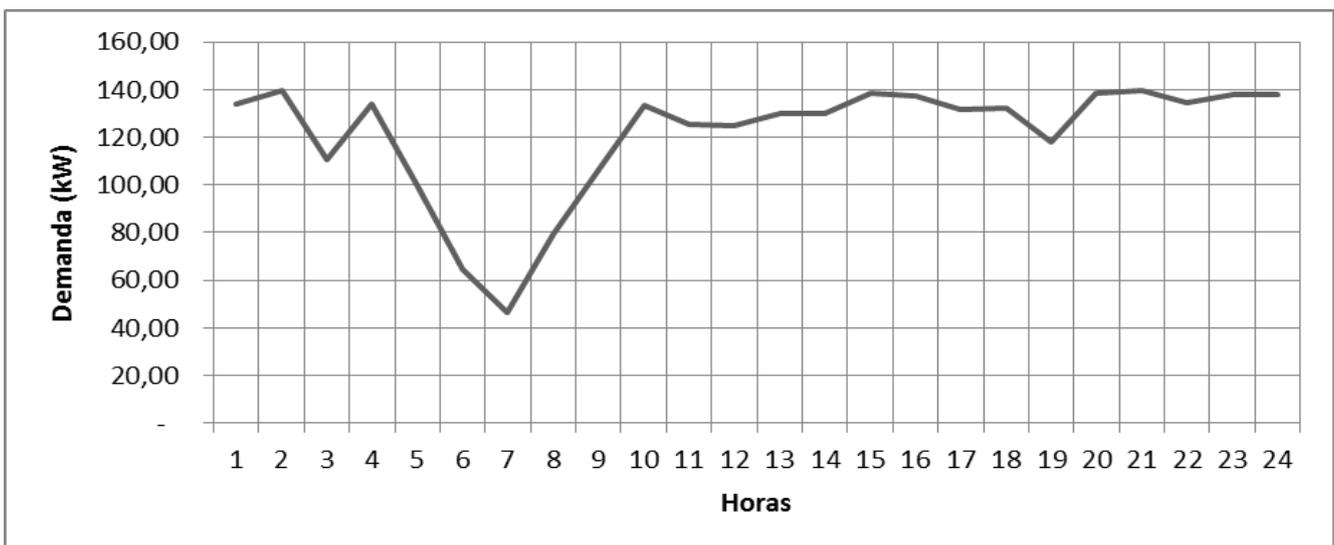


Gráfico 04 - Curva da demanda de energia elétrica com ventilação variável: Túnel Contínuo 03 [em: 31/Out/2012]

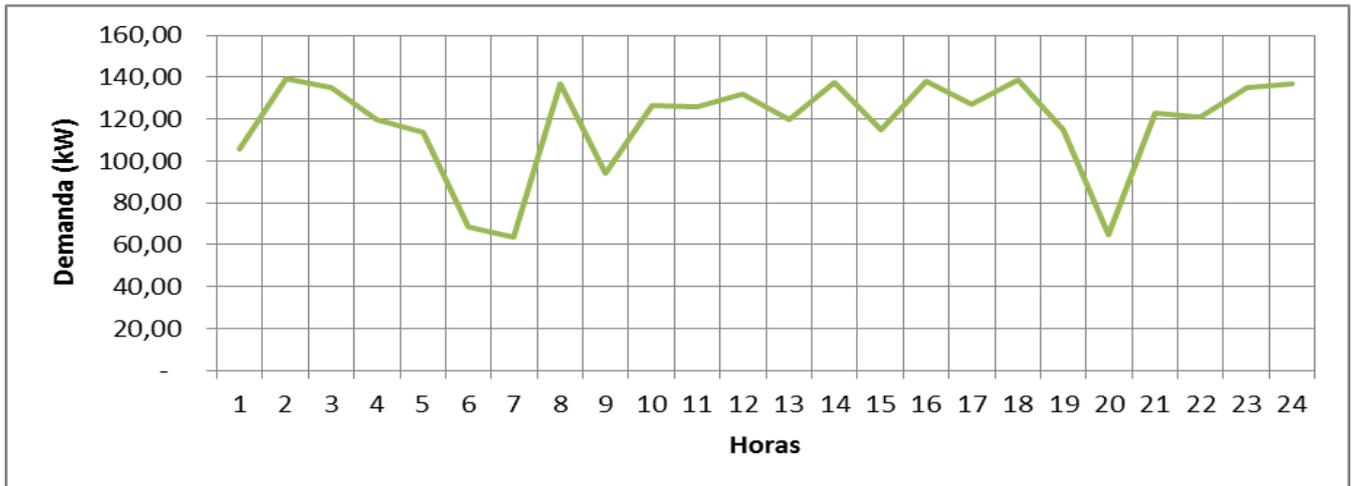


Gráfico 05 - Curva da demanda de energia elétrica com ventilação variável: Túnel Contínuo 03 [em: 01/Nov/2012]

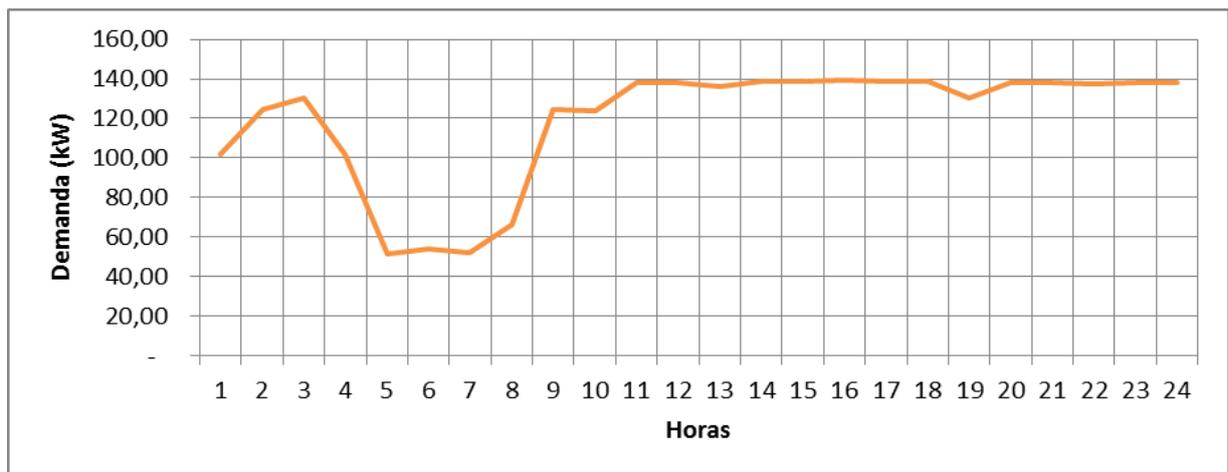


Gráfico 06 - Curva da demanda de energia elétrica com ventilação variável: Túnel Contínuo 03 [em: 02/Nov/2012]

- *Quarta fase*: foi realizado um comparativo do consumo energético entre os dois sistemas, e acompanhamento do controle da temperatura de saída dos produtos do túnel 03 nas duas situações antes e após a implantação da ventilação variável, gráficos 07 e 08.

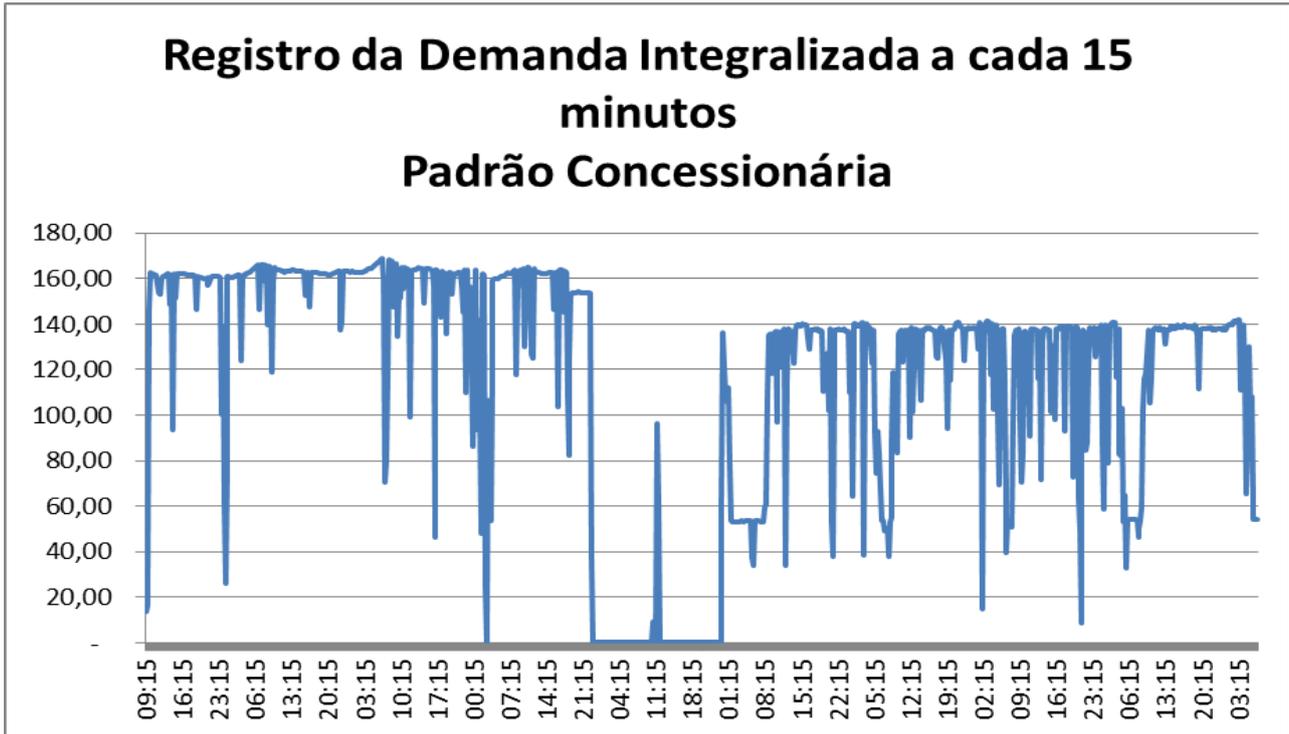


Gráfico 07 - Curva da demanda de energia elétrica com e sem ventilação variável. Demanda integralizada a cada 15 minutos.

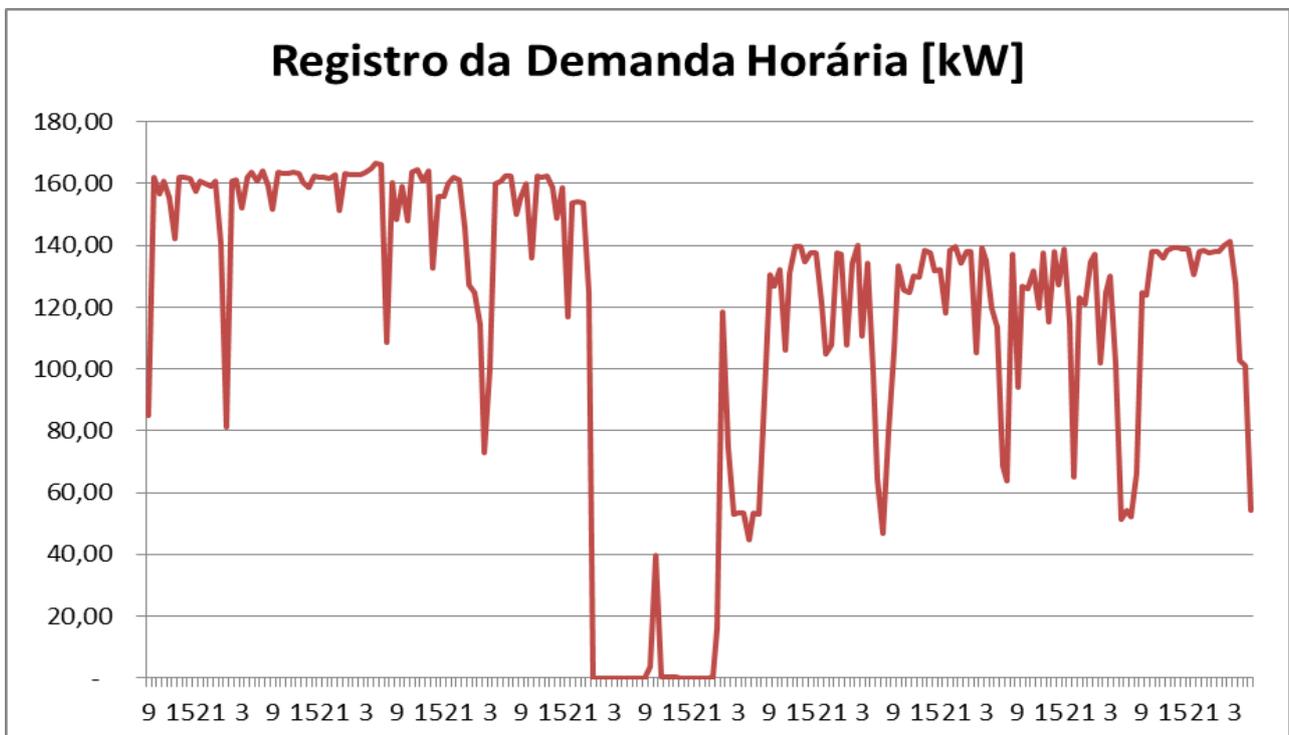


Gráfico 08 - Curva da demanda de energia elétrica com e sem ventilação variável. Demanda horária.

Com o novo sistema, as velocidades dos ventiladores diminuíram, obtendo redução do consumo de energia elétrica. Além disso, as temperaturas de saída dos

produtos que tiveram o mesmo tempo de retenção no túnel apresentaram melhoras, atingindo temperaturas de congelamento mais baixas quando comparadas com o sistema de ventilação contínua (Planilha 02).

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foi possível verificar que com a utilização do sistema de ventilação contínua havia uma demanda média integralizada de 168,72 kW por dia e após a implantação do sistema de ventilação variável a demanda média integralizada reduziu para 142,06 kW (Planilha 01).

Houve uma redução de 26,65 kW da demanda média do túnel de congelamento 03, mesmo trabalhando com o túnel de congelamento apresentando vazamentos e com a capacidade requerida de 1,8% acima da capacidade de evaporação instalada.

Essa configuração ensaiada poderá promover à empresa um ganho médio anual de R\$ 45.069,34 ou R\$32.138,13 sem impostos. Resultados gerados conforme o Programa de Eficiência Energética (PEE) constante no Manual Para Elaboração do Programa de Eficiência Energética da Aneel 2008.

De acordo com a avaliação econômica padrão da empresa BRF (Anexo 03) demonstrou ganho médio anual de R\$ 27.400,00. O que demonstra um impacto muito positivo, uma vez que este sistema de teste foi aplicado apenas a um dos cinco túneis de congelamento que a empresa possui.

No que tange a temperatura de congelamento dos produtos que saíram do túnel 03, após a implantação do sistema de ventilação variável, pode se observar que nenhum produto apresentou desconformidade da faixa de temperatura exigida pela inspeção sanitária federal, máxima de -18°C, o que demonstrou efetividade no congelamento (Planilha 02) e redução energética (Planilha 01).

Podemos observar também que produtos que tiveram tempos de retenção semelhantes dentro do túnel, apresentaram temperaturas inferiores com o sistema de ventilação variável.

Tempo	Temperatura
06:49	-19,3
06:53	-15,1
07:04	-14,6
07:10	-16,3
07:11	-18,3
07:18	-15,7
07:20	-17,4
07:21	-18,8
07:24	-22,4
07:33	-15,7
07:43	-14,6
07:50	-21,3
11:27	-25
12:01	-23

Tempo	Temperatura
06:55	-20
06:57	-22
07:45	-26
08:04	-18
10:06	-28
10:26	-25
10:43	-28
11:39	-29
11:56	-29
11:58	-30
12:27	-32
12:28	-29
12:39	-29
12:59	-29

Legenda:

	Ventilação contínua
	Ventilação variável

Planilha 02 - Quadro comparativo das temperaturas de saída do túnel 03, para frangos de 1.500 gramas.

4.3.1 Consumo energético do túnel 03

Com a instalação do analisador de energia conseguimos obter os dados da demanda dos motores dos ventiladores do túnel de congelamento. O analisador gerou arquivos em formato Excel, possibilitando a comparação das curvas de consumo para melhor visualização do impacto do sistema de ventilação variável em contraposição com o sistema de ventilação contínua.

Analisando os gráficos 01, 02 e 03, percebeu-se que a demanda apresenta pouca variação ao longo do dia. Mesmo sem entrada de produtos no túnel durante a madrugada a demanda permanece com pouca oscilação em torno de 160 kW; já nos gráficos 04, 05 e 06 observa-se que, devido a inércia da carga térmica começamos a perceber uma variação na ventilação do túnel 03 somente em torno das 04:30 minutos apesar dos produtos pararem de entrar no túnel de congelamento aproximadamente às 02:30 minutos.

Da mesma forma, o retorno da entrada de produtos no túnel 03 inicia às 06:30 minutos, porém, a ventilação somente volta a subir sua rotação em torno das 08:30 minutos, podemos visualizar a maior redução de consumo no período entre 04 e 10 horas da manhã.

4.3.2 Análise Técnico Econômica

Levando em consideração os critérios para avaliação econômica dos projetos da PEE gerou-se a planilha 03 com base nos cálculos do custo da demanda evitada e o custo da energia evitada.

São considerados como custos (de demanda e de energia) para o atendimento de uma unidade consumidora, os incorridos em todo o sistema eletricamente a montante da unidade consumidora, inclusive aqueles do segmento onde a mesma encontra-se ligada.

As tarifas praticadas para o setor industrial (azul, subgrupo A3) pela concessionária AESSUL, com e sem impostos, encontram-se na planilha 04. O detalhamento dos impostos está mostrado na planilha 05.

Análise Técnico Econômica	Atual	Eficiente	Resultado
Demanda Horária Evitada [kW]	168,72	142,06	26,65
Demanda Média Diária Evitada [kW]	151,27	115,39	35,89
Energia Economizada Anual [MWh]	1.121,38	855,36	266,02
Investimento [R\$]			R\$ 42.000,02
Custo da Energia Economizada	R\$ 138.008,54	R\$ 105.269,28	R\$ 32.739,26
Custo da Demanda Evitada	R\$ 15.184,44	R\$ 12.785,57	R\$ 2.398,87
Fatura de Energia Elétrica	R\$ 153.192,97	R\$ 118.054,85	R\$ 35.138,13
Horas de Operação na Ponta	0	0	0
Horas de Operação Fora da Ponta	21	21	11
Dias de Operação Anual	353	353	353

Planilha 03 – Análise técnico econômica do sistema de ventilação variável.

Na determinação dos custos unitários evitados deve-se considerar a seguinte estrutura de valores da tarifa horosazonal azul para cada subgrupo tarifário, homologadas por empresa pela ANEEL:

Custo Unitário Evitado de Demanda (CED)

$$CED = (12 \times C_1) + (12 \times C_2 \times LP) \quad \text{R\$/kW.ano} \quad 13$$

Custo Unitário Evitado de Energia (CEE)

$$CE = \frac{C_3 \times LE_1 + C_4 \times LE_2 + C_5 \times LE_3 + C_6 \times LE_4}{LE_1 + LE_2 + LE_3 + LE_4} \quad \text{[R\$/MWh]} \quad 14$$

onde:

- LP - constante de perda de demanda no posto fora de ponta, considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta.
- LE₁, LE₂, LE₃ e LE₄ - constantes de perdas de energia nos postos de ponta e fora de ponta para os períodos seco e úmido, considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta.
- C1 - custo unitário da demanda no horário de ponta [R\$/kW.mês];
- C2 - custo unitário da demanda fora do horário de ponta [R\$/kW.mês];
- C3 - custo unitário da energia no horário de ponta de períodos secos [R\$/MWh];
- C4 - custo unitário da energia no horário de ponta de períodos úmidos [R\$/MWh];
- C5 - custo unitário da energia fora do horário de ponta de períodos secos [R\$/MWh];
- C6 - custo unitário da energia fora do horário de ponta de períodos úmidos [R\$/MWh]

Os valores das constantes LP e LE são calculados a partir dos postos horários da tarifa horosazonal azul, com base em uma série de Fatores de Carga (FC) e Fatores de Perdas (Fp), segundo a fórmula a seguir:

$$Fp = k \times FC + (1 - k) \times FC^2 \quad 15$$

onde:

- k varia de 0,15 a 0,30.
- FC - Fator de Carga do segmento elétrico, imediatamente a montante daquele considerado ou, que sofreu a intervenção, ou ainda, na falta deste, admitir-se-á o médio da Empresa dos últimos 12 meses.

Tarifa de Energia Elétrica		
TARIFA PRATICADA	AZUL - A3	C/Impostos
Cons. Ponta Seca	0,26034	R\$ 0,33392
Cons. Ponta Úmida	0,23518	R\$ 0,30165
Cons. Fora Ponta Seca	0,16124	R\$ 0,20681
Cons. Fora Ponta Úmida	0,14664	R\$ 0,18809
Demanda Ponta	28,15	R\$ 36,10613
Demanda Fora Ponta	7,50	R\$ 9,61975

Planilha 04 - Tarifas praticadas pela AESSUL para o cliente do grupo Azul - A3.

ICMS	18,0%	
COFINS	3,9350%	
PIS/PASEP	0,1004%	4,0354%
TOTAL	22,0354%	

Planilha 05 – Detalhamento dos impostos.

Analisando as planilhas 06 e 07 onde são apresentadas a relação custo benefício (RCB), tanto para o cliente quanto para a concessionária, constatamos que o investimento no sistema de ventilação se trata de um projeto com excelente retorno.

Investimento em Variação de Velocidade

Conservação de Energia	24%
Investimento Total:	42.000 R\$
Energia Economizada (EC):	266,02 MWh
Redução Demanda Ponta (RP):	26,65 kW
Investimento anualizado:	7.433 R\$
RCB	0,13
Investimento Evitado:	57.095 R\$

Planilha 06 – Relação custo benefício para o cliente (BRF).

Investimento em Variação de Velocidade

Conservação de Energia	24%	
Investimento Total:	42.000	R\$
Energia Economizada (EC):	266,02	MWh
Redução Demanda Ponta (RP):	26,65	kW
Investimento anualizado:	7.433	R\$
RCB	0,14	
Investimento evitado:	55.037	R\$

Planilha 07 – Relação custo benefício para a concessionária (AESSUL).

Onde:

$RCB = \text{Investimento anualizado} / (\text{EC} \times \text{CMG} + \text{RP} \times \text{CMTD})$;

EC = energia economizada [MWh/ano];

CMG = custo marginal de expansão da geração [R\$/MWh];

RP = redução da demanda na ponta [kW];

CMTD = custo marginal de expansão da transmissão e distribuição [R\$/kW].

A planilha 06 nos fornece uma relação custo benefício de 0,13, que pode ser interpretada como: com os ganhos da ventilação variável a cada R\$0,13 investidos pelo cliente em um sistema de eficiência energética, R\$1,00 é poupado em energia elétrica.

Para a concessionária AESSUL, podemos fazer uma interpretação semelhante (planilha 07). Para cada R\$0,14 investidos pela concessionária em eficiência energética, R\$1,00 é deixado de ser gasto na distribuição de energia.

Outra análise importante é em relação aos valores de financiamento e o tempo de retorno do investimento. Para um financiamento de R\$42.000,00, que foi o valor gasto em aquisição de equipamentos e mão de obra, o valor em energia economizada é suficiente para pagar as parcelas do financiamento.

O valor da parcela do financiamento é de R\$2.686,89 por mês e a economia em energia com o sistema de ventilação variável é de R\$2.778,49 mensais. Verifica-se que com o valor da economia é possível pagar a parcela do financiamento com

um ganho a favor da empresa de R\$91,60. Nessa perspectiva o investimento é pago em 17 meses (planilha 08).

Cálculo Econômico - Financeiro	
Investimento Total	R\$42.000,02
Diagnóstico Energético	R\$0,00
Total do Serviço a ser Financiado	R\$42.000,02
Economia Anual de Energia	
Economia de Energia Anual Atualizada	R\$35.138,13
Parcela Mensal da Economia de Energia	R\$2.778,49
Parcela mensal de Economia	R\$2.778,49
Número Parcelas Financ. f(Economia Energia)	
	17
Valor Mensal das Parcelas de Financiamento	
	R\$2.686,89
Valor Presente do Montante Financiado Concessionária	
	R\$42.398,55
Valor Presente do Montante Financiado Cliente	
	R\$42.398,55
Valor Total do Contrato	
	R\$45.677,08

Planilha 08 – Valores do investimento e tempo de retorno do investimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após as análises de todos os dados registrados em observação e experimento, pode-se avaliar que as premissas impostas no projeto de ventilação variável foram atendidas para o túnel de congelamento contínuo 03 da empresa BRF, sendo capaz de apresentar uma redução significativa na demanda de energia elétrica sem comprometer o congelamento e a qualidade dos produtos.

A implantação do sistema de controle, que permite modular a velocidade dos ventiladores de acordo com a carga térmica presente no túnel, resultou em um impacto positivo na redução da demanda energética, visto que com a mesma carga térmica os ventiladores operaram em uma rotação mais baixa, os gráficos expostos na análise de resultados deixam visível esta redução, expresso na análise econômica dos resultados.

Explorar melhor o controle de velocidade proporcionado pelo sistema PID em combinação com os inversores de frequência foi de grande valia, pois se conseguiu concretizar o que foi pensado e projetado, visto que se conseguiu baixar a rotação dos motores diminuindo a velocidade do ar, otimizando o congelamento dos produtos.

Sabe-se que para que o congelamento dos produtos ocorra de forma mais rápida, a velocidade do ar em túneis de congelamento deve variar entre 5 e 6 m/s. Portanto, com a implantação do novo sistema (ventilação variável) chegamos mais próximo deste valor de referência, obtendo uma velocidade, pontuada em 8,02 m/s à frequência de 40 Hz, quando anteriormente obtínhamos uma velocidade de 11,62 m/s à frequência de 60 Hz.

Pelos cálculos realizados, permite-se supor que se fosse baixada a rotação dos ventiladores para 906 rpm a uma frequência de 30 Hz, isso faria com que a velocidade do ar que passasse pelos produtos estivesse entre 5 e 6 m/s. Desta maneira o escoamento seria turbulento melhorando a troca térmica entre o produto e meio, em conformidade com a teoria da camada limite.

Para se atingir o ideal desejado é de grande importância continuar com o estudo deste sistema na promoção de sua expansão para os demais túneis de congelamento que a empresa possui, a fim de se conseguir estabelecer os mesmos ganhos.

Com os resultados obtidos nesse estudo, a empresa multinacional BRF já manifestou o interesse em expandir o experimento realizado no túnel 3, para os outros quatro túneis existentes na empresa localizada em Lajeado/RS.

Por fim são apresentadas algumas sugestões sobre trabalhos futuros que acrescentariam neste estudo:

- Estabelecer qual o limite do tempo de retenção do túnel *versus* temperatura saindo na temperatura máxima de -18°C ;
- Como se pode dar estabilidade e confiabilidade ao processo;
- Inserir no software a coleta de dados de frequência com emissão de relatórios para podermos analisar a variação;
- Fluxograma de análise de processo;
- Estabelecimento de indicadores para controle;
- Colocar Datta Loger no produto para traçar curvas e fazer análises;
- Acompanhar o indicador de kWh/TPA a partir do início dos trabalhos (kWh por Tonelada de Produto Acabado).

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Manual para elaboração do programa de eficiência energética [Ciclo 2008_(b)]**. Disponível em:

http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=manual%20para%20elabora%C3%A7%C3%A3o%20do%20programa%20de%20efici%C3%Aancia%20energ%C3%A9tica%20%5Bciclo%202008%5D&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CEcQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fquivos%2FPDF%2FMANUAL_ELABORACAO_DO_PEE_CICLO_2005-2006_REV_DEZ_2005.pdf&ei=0skrUYn9B4bHtAayvYHAAg&usq=AFQjCNHk8lXt6ulofi9EWz-u6a35xMWp4g&bvm=bv.42768644,d.Yms>. Acesso em: Nov/2012.

ANONYMOUS. **Recommendations for the processing and handling of frozen foods. International Institute of Refrigeration**, Paris. Disponível em <<http://www.iifiir.org>> Acesso em: Fev/2013.

ASHRAE, ASHRAE Handbook. 1998, **Refrigeration**, ASHRAE Inc., Atlanta, GA, 1994.

BRASIL. Portaria nº 210 de 1998.

CAMACHO, Mario Antonio da Gama. *Modelo para Implantação e Acompanhamento de Programa Corporativo de Gestão de Energia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Dissertação de Mestrado*. São Paulo: Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Fev/2009.

CHAGAS, J. A. C. **Projeto e construção de câmaras frigoríficas**. YORK RefrigerationContractingDivision, 2009.

CHAPLIN, M. **Water structure and behavior, Water and aqueous systems research**, London, South Bank, University, London, UK, 2004.

DELGADO, A. E. *D-W Sun. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes—a review*. **Journal of Food Engineering**, 2001.

ELETROBRAS. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/procel/>>. Acesso em: Nov/2012.

ELETROBRAS. **Guia de Medição e Verificação**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2007.

FABIANO, A. N.; FERNANDES, Sandro M.; PIZZO, Deovaldo Moraes Jr. **Termodinâmica química**. Ceará: UFC, 2006. Disponível em:

<<http://www.google.com.br/search?client=opera&q=FABIANO,+A.+N.%3B+FERNANDES,+Sandro+M.%3B+PIZZO,+Deovaldo+Moraes+Jr.+Termodin%C3%A2mica+qu%C3%ADmica&sourceid=opera&ie=utf-8&oe=utf-8&channel=suggest>>. Acesso em Nov-Dez/2012.

FENNEMA, O. *Water and ice*. In: **O Fennema**, Ed., Food Chemistry, 3rd ed., New York: Marcel Dekker, 1996.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos** (Trad. da 5ª edição americana). Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GELLER, H. S. **Revolução Energética – Políticas para um Futuro Sustentável**. Rio de Janeiro: RelemuDumará, 2003.

GODOI, J. M. A. *Metodologia para gestão da eficiência energética de sistemas industriais sob condicionantes socioambientais sustentáveis*. **Monografia de Conclusão de Curso**, Universidade de São Paulo - USP, 2008.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.. **Fundamentos de Física 2**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HARTEL, R. **Crystallization in Foods**. Maryland: Aspen Publishers Inc., 2001.

LAVELLE, J.; HFCs Will Find Greater Use as CFCs Diminish, **Air Conditioning, Heating & Refrigeration News**, Feb. 17, 1997.

LIENHARD, J. H. **A Heat Transfer Textbook**, Phlogiston Press, 2012.

MESQUITA, N. **Redução do consumo energético de um equipamento de frio**. Projecto Universidade do Porto Faculdade de Engenharia – PT, 2009.

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3ª. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000

NOVUS ELETRÔNICOS. **Controle PID básico [Artigo Técnico, 2003]**. Disponível em:

<<http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=controle%20pid%20b%C3%A1sico&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.martinezuzim.com.br%2Farquivos%2520pdf%2Fpid%2520basico.pdf&ei=LskrUdnMLoidtQbs4oH4AQ&usq=AFQjCNHZKkyd2KfrHRAWj-5S5zA27df84g&bvm=bv.42768644,d.Yms>>. Acesso em: Out-Nov/2012.

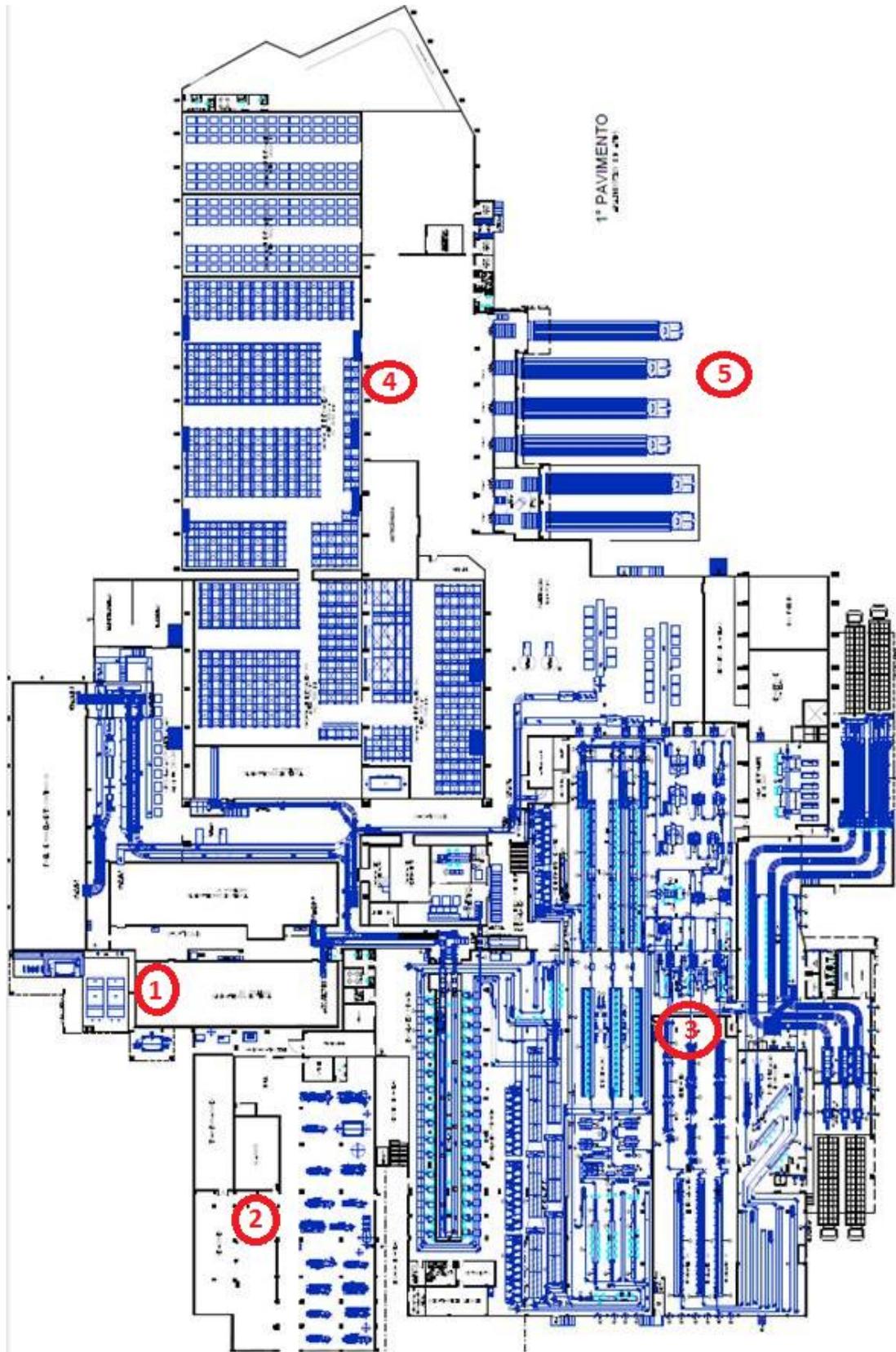
OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Editora Prentice Hall, Rio de Janeiro, 2000.

ROÇA, R. O. **Tecnologia da carne e produtos derivados**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, 2000.

SHAMES, I. H. **Mecânica dos Fluidos** [Volume 1]. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2009.

ZARITZKY, N. **Physical–Chemical Principles in Freezing**, Taylor & Francis Group, 2006.

ANEXOS

Anexo 1 - Representação da planta baixa da BRF - Unidade de Lajeado/RS

- 1 – Túnel de congelamento 03; 2 – Sala de máquinas e quadros elétricos; 3 – Produção;
4 – Câmaras de estocagem; 5 – Saída de caminhões com a produção.

Anexo 02 – Exemplo de tarifa emitida pela AESSUL — tarifação para o subgrupo A3 (69kV) [Fonte: www.aessul.com.br Acesso em 03/02/2013].

	Demanda R\$/kW		Demanda Ultrap R\$/kW	
	Ponta	F. Ponta	Ponta	F. Ponta
Subgrupo A2(88kV A 138 kV)				
Indústria - comércio - poder/serviço público	23,24	5,67	46,48	11,34
SERVS.Púb. Água, esgoto e saneamento	19,754	4,8195	46,48	11,34
Subgrupo A3 (69 kV)				
Indústria - comércio - poder/serviço público	28,15	7,50	56,30	15,00
SERVS. Púb. Água, esgoto e saneamento	23,9275	6,375	56,30	15,00
Rural	25,335	6,750	56,30	15,00
Subgrupo A4 (2,3 kV A 25 kV)				
Indústria - comércio - poder/serviço público	45,16	14,11	90,32	28,22
SERVS. Púb. Água, esgoto e saneamento	38,386	11,9935	90,32	28,22
Rural	40,644	12,699	90,32	28,22
Consumo R\$/kWh				
	Ponta Seca	Ponta Úmida	F. Ponta Seca	F. Ponta Úmida
Subgrupo A2 (88kV A 138 kV)				
Indústria - comércio - poder/serviço público	0,260340	0,235180	0,161240	0,146640
SERVS.Púb. Água, esgoto e saneamento	0,221289	0,199903	0,137054	0,124644
Subgrupo A3 (69 kV)				
Indústria - comércio - poder/serviço público	0,260340	0,235180	0,161240	0,146640
SERVS.Púb. Água, esgoto e saneamento	0,221289	0,199903	0,137054	0,124644
Rural	0,234306	0,211662	0,145116	0,131976
Subgrupo A4 (2,3 kV A 25 kV)				
Indústria - comércio - poder/serviço público	0,260340	0,235180	0,161240	0,146640
SERVS.Púb. Água, esgoto e saneamento	0,221289	0,199903	0,137054	0,124644
Rural	0,234306	0,211662	0,145116	0,131976

Anexo 03 - Planilha de Avaliação Econômica Padrão (PAEP), utilizada pela BRF para a possível viabilização de projetos

Energia Elétrica	Atual	Proposto	Premissa
Horário de trabalho			
das (1-24h)	4:30	4:30	
às (1-24h)	2:30	2:30	
Horário de ponta			
das (1-24h)	18:00	18:00	
às (1-24h)	21:00	21:00	
Horas na ponta (Hrs/dia)	0	0	
Horas fora da ponta (Hrs/dia)	21	21	
Dias no mês	22	22	
Meses no ano	12	12	
Potência instalada			
Unidade	KiloWatt (Kw)	KiloWatt (Kw)	
Potência	168,72	142,06	
Tarifas de consumo			
Ponta (R\$/Kwh)	0,26034	0,26034	
Fora da ponta (R\$/Kwh)	0,16124	0,16124	
Tarifas de Demanda			
Ponta (R\$/Kw)	28,15	28,15	
Fora da ponta (R\$/Kw)	7,5	7,5	
Consumo de Energia (MR\$/Ano)			
Ponta (MR\$)	0,0	0,0	
Fora da ponta (MR\$)	158,0	133,0	
Demanda (MR\$/Ano)			
Ponta (MR\$)	0,0	0,0	
Fora da ponta (MR\$)	15,2	12,8	
Resultado do projeto (MR\$/Ano)		27,4	

Tabela de conversões	Kw/Unidade
Cavalos (cv)	0,736
Watt (w)	1000
KiloWatt (Kw)	1,0
MegaWatt (Mw)	0,001

Anexo 04

CÁLCULOS TÉRMICOS REFERENTES AO TÚNEL 03

Para a definição das características do sistema de congelamento, a primeira análise a ser efetuada é o cálculo de carga térmica. Que consiste na quantidade de calor sensível e latente que deve ser retirada de um ambiente, de modo a serem mantidas as condições de temperatura e umidade estabelecidas para ele (FERNANDES; PIZZO; MORAES, 2006).

Cálculo da carga térmica do produto

Calor sensível antes do congelamento:

Tem-se:

$$Q_{S1} = m \cdot C_e \cdot \Delta t$$

16

onde:

$m = 11.550$ Massa de produto (kg/h)

$C_e = 0,79$ Calor específico antes do congelamento (kcal/kg.°C)

$T_i = 10$ Temperatura inicial (°C)

$T_f = -2,6$ Temperatura final (°C)

$\Delta t = 12,6$ Diferença de temperatura (°C)

$$Q_{S1} = 114.969 \text{ kcal/h}$$

Calor latente

$$Q_l = m \cdot C_l$$

17

onde:

$m = 11.550$ Massa de produto (kg/h)

$C_l = 59$ Calor latente de congelamento (kcal/kg) $Q_l = 681.450 \text{ kcal/h}$

Calor sensível depois do congelamento:

Tem-se:

$$Q_{s2} = m \cdot C_e \cdot \Delta t$$

18

onde:

$m = 11.550$ massa de produto (kg/h)

$C_e = 0,39$ Calor específico depois do congelamento (kcal/kg.°C)

$T_i = -2,6$ Temperatura inicial (°C)

$T_f = -18$ Temperatura final (°C)

$\Delta t = 15,4$ Diferença de temperatura (°C)

$$Q_{s2} = 69.639 \text{ kcal/h}$$

Calor a absorver do produto:

Tem-se:

$$Q_T = Q_{s1} + Q_l + Q_{s2}$$

19

onde:

$$Q_T = 865.788 \text{ kcal/h}$$

Calor gerado pelos motores elétricos:

Tem-se:

$$Q_m = \frac{n \cdot P \cdot F \cdot t}{T}$$

20

onde:

$n = 9$ Número de motores

$P = 15$ Potência dos motores (cv)

$F = 632$ Fator de conversão (1CV = 632 kcal/h)

$t = 24$ Tempo de funcionamento dos motores (h)

$T = 16,4$ Tempo de processamento (h)

$$Q_m = 124.859 \text{ kcal/h}$$

Calor que penetra pelo isolamento:

Tem-se:

$$Qi = \frac{C.St.t}{T}$$

21

onde:

$C=16$ Fluxo de calor (kcal/h.m²)

$St=1162$ Superfície total das paredes (m²)

$t=24$ Tempo de funcionamento (h)

$T=16,4$ Tempo de processamento (h)

$$Qi = 27.198 \text{ kcal/h}$$

Carga térmica total do túnel 03:

Considerando-se que:

Σ (Carga térmica do produto + Carga térmica motores elétricos + Carga térmica isolamento)

$$QT = 1.017.845 \text{ kcal/h}$$

Em determinados momento estamos trabalhando 1,8% acima da capacidade térmica do túnel 03.

Determinação da vazão de amônia:

Tem-se o que segue:

Entalpias e densidade da amônia para os Regimes -35/-10°C e -10/+35°C

$h1 = 334,41$ kcal/kg

$h2 = 374,36$ kcal/kg

$h3 = 345,85$ kcal/kg

$h4 = 398,64$ kcal/kg

$h5 = 86,59$ kcal/kg

$h6 = 86,59$ kcal/kg

$h7 = 36,96$ kcal/kg

$$h8 = 36,96 \text{ kcal/kg}$$

$$h9 = 10,03 \text{ kcal/kg}$$

$$h10 = 349,3 \text{ kcal/kg}$$

$$h11 = 86,59 \text{ kcal/kg}$$

$$h12 = 47,84 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Densidade amônia (-35°C)} = 0,0015 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Densidade amônia (-10°C)} = 0,0015 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Densidade amônia (0°C)} = 0,0016 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Densidade amônia (+35°C)} = 0,0017 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Vazão mássica de amônia requerida para o túnel 03

Tem-se:

$$Gh1 = \frac{QT}{(h1-h9)} \quad 22$$

Onde: **$Gh1 = 3.357 \text{ kg/h}$**

$Gh1$ = É a vazão mássica de amônia que deve passar pelos evaporadores de túnel 03, determinada a partir da carga térmica requerida. O túnel deve conter calibradores ou válvulas de agulha na entrada dos evaporadores. O rendimento aproximado do evaporador é de 85,4%.

4.4.1.10 Vazão volumétrica de amônia requerida para o túnel 03:

Tem-se:

$$V1 = Gh1.v \quad 23$$

$$V1 = 4,90 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V1 = 4.901 \text{ l/h}$$

Esta vazão deve ser multiplicada por uma taxa de recirculação igual a quatro, sendo assim devemos ter uma vazão de 19.606 l/h para operação do túnel,

atualmente estamos operando com duas bombas totalizando uma vazão de 40.000 l/h.

Deve-se ter o cuidado de se realizar testes com apenas uma bomba em operação, pois assim teremos uma redução de 7,5 cv no consumo de energia do túnel de congelamento contínuo 03.