



# TECNOLOGIA PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

## TECHNOLOGY FOR ENERGY EFFICIENCY IN A FOOD INDUSTRY

Simone Aparecida Rocha<sup>1</sup>  
Davidson Andreoni Rocha<sup>2</sup>  
Sinaide Nunes Bezerra<sup>3</sup>

Submetido em: 23/02/2023

Aprovado em: 30/05/2023

### RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o estudo estatístico dos resultados de um projeto de eficiência energética, desenvolvido e financiado pela Companhia Energética de Minas Gerais, com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica e também a demanda de uma indústria alimentícia. Foi eficientizado o sistema de refrigeração, através da melhoria do consumo específico kWh/TR. A partir da metodologia para medição, amparada no Protocolo Internacional de Medição e Verificação e da experiência da CEMIG em projetos, foram indicadas melhorias realizadas na planta, sendo previsto, através de intervenções nos compressores, o aumento da capacidade de geração de frio de 7.398.812 kcal/h para 10.921.204 kcal/h. Por meio da massa de dados obtida através das medições, houve evidências estatísticas de que as intervenções realizadas levaram ao aumento da produção e ao menor consumo de energia elétrica.

**Palavras Chave:** Análise Estatística, Eficiência Energética, Consumo Eficiente.

### ABSTRACT

This paper presents a statistical study of the results of an efficiency project developed and financed by an energy company to reduce the consumption and demand for electrical energy in the food industry. The refrigeration system was optimized by improving the specific consumption kWh/TR. Based on the measurement methodology, supported by the international measurement and verification protocol, and the company's project experience, improvements in the system were identified, with interventions in the compressors to increase the refrigeration generation capacity from 7,398,812 kcal/h to 10,921,204 kcal/h. The data obtained from the measurements statistically proved that the interventions resulted in higher production and lower electricity consumption.

**Keywords:** Statistical analysis. Energy efficiency. Efficient consumption.

---

<sup>1</sup> Doutoranda em Modelagem Matemática e Computacional pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG. Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional e em Educação Tecnológica pelo CEFET/MG. Contato: simonerocha.025@gmail.com.

<sup>2</sup> Mestre em Administração Redes Empresariais, Inovação e Competitividade, pelo Centro Universitário UNA. Graduação em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas. Coordenador do Curso Master em Eficiência Energética e Qualidade de Energia da PUC Minas. Contato: davidson.andreoni@sga.pucminas.br

<sup>3</sup> Doutor em Modelagem Matemática e Computacional (CEFET-MG). Professor do curso de Sistemas de Informação da PUC Minas. Contato: sbezerra@sga.pucminas.br

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável é um desafio que enfrenta a sociedade moderna. A necessidade crescente de energia tem produzido ao meio ambiente consequências como altos índices de poluição, desmatamentos, destruição de nascentes e o aquecimento global, dentre tantas outras. É importante repensar as formas de uso de energia e seus impactos, dando preferência àquelas renováveis e não poluentes, verificando-se possibilidades de reverter os impactos na natureza para que, em longo prazo, atinja-se o desenvolvimento com sustentabilidade.

Das formas de energia possíveis, uma das mais importantes para a população, o comércio e a indústria é a elétrica, produzida a partir de uma fonte primária, que pode ser não poluidora e renovável ou poluente e não renovável. Os programas de eficiência energética encontram-se entre as formas de reduzir os impactos da geração de energia elétrica e podem ocorrer visando a instalação de equipamentos de uso final mais eficientes, redução de desperdícios, consumo melhor distribuído ao longo do dia, dimensionamento adequado de componentes. Segundo estudos de Ernest e Young (2011), o Brasil vai se transformar nos próximos 15 anos em um dos cinco maiores consumidores de energia do mundo, com investimento de US\$ 310 bilhões em geração de energia até 2030.

O uso da energia elétrica representa uma parcela considerável do custo final dos produtos nas indústrias alimentícias (Junior, 2009). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) reconhece e incentiva projetos para redução do consumo de energia motivando, em seu manual para orientação a programas de efficientização do uso da energia, o envolvimento das concessionárias de energia elétrica.

Para a análise do potencial de economia alcançado com a implementação de projetos, metodologias baseadas no Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance EVO (2014), são reconhecidas pela ANEEL, por possibilitar uma avaliação mais criteriosa dos procedimentos e metodologias de apuração dos resultados de Medição e Verificação (M&V) e uma uniformização dos resultados de projetos dos Programas de Eficiência Energética (PEE). Nesse contexto, em 2014, a Efficientia S. A., subsidiária do grupo CEMIG, realizou um projeto de otimização do sistema de

refrigeração de uma indústria alimentícia com foco no abate de frangos. Este projeto motivou um planejamento de experimento que teve como objetivos:

- redução do consumo específico de refrigeração da planta, ou seja, no consumo de energia dado em kWh pelo consumo térmico dado em tonelada de refrigeração (TR);
- acréscimo da capacidade de geração de frio, de 7.398.812kcal/h para 10.821.204 kcal/h, para permitir o aumento da capacidade produtiva.

Seguindo as orientações do Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance, a partir da visita *in loco* do processo de produção foram realizadas medições pontuais em amostras do sistema, nos equipamentos envolvidos no processo, sendo a produção e o consumo de energia identificadas como variáveis de resposta.

Alterações propositais foram feitas nas variáveis de entrada, sobretudo com a modificação de equipamentos. Realizou-se a troca do motor de um sistema compressor de 300 CV por outro automatizado de 450 CV. Também foram instalados um separador de líquidos e um condensador evaporativo (51 CV e 2.634.000 kcal/h). Além destas modificações, foram realizadas também adequações da casa de compressores, instalação mecânico-pneumática de novos equipamentos e tubulações para atendimento ao novo sistema, que contribuíram para a redução da pressão de condensação de 13.8 bar para 12.4 bar, com conseqüente redução de cerca de 10% do consumo de energia dos compressores.

Conforme preconizado pelo protocolo internacional de medição e verificação – PIMVP, para a avaliação das possíveis alterações acarretadas foi realizada a análise dos dados de produção mensal e a medição dos parâmetros de consumo mensal de energia, por meio de medidores calibrados.

## **2. ETAPAS E PREMISSAS DO PROJETO**

No Brasil, o controle sanitário de alimentos é responsabilidade compartilhada entre órgãos e entidades da administração pública como o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), o Ministério de Minas e Energia (MME), o Programa de Proteção e Defesa do Consumidor (PROCON), o Departamento Estadual de Polícia do Consumidor (DECON), com destaque para a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e para o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

De acordo com CIMA (2016), são alvo de incumbências da ANVISA a regulamentação, o controle e a fiscalização de produtos e serviços que envolvam risco à saúde pública, como os bens e produtos de consumo submetidos ao controle e fiscalização sanitária, dos quais os alimentos, inclusive bebidas, águas envasadas, seus insumos, suas embalagens, aditivos alimentares, limites de contaminantes orgânicos, resíduos de agrotóxicos e de medicamentos veterinários.

O MAPA é responsável pela inspeção dos alimentos exclusivamente de origem animal (carnes, leite, ovos, mel, pescados e seus derivados), bebidas em geral (não alcoólicas, alcoólicas e fermentadas) e vegetais in natura. Todo estabelecimento de produtos origem animal deve possuir registro dentro do Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal (D.I.P.O.A.), antes mesmo do início do processo de produção e comercialização, seja nacional ou internacional. Conforme o Art. 51 do Decreto nº 30.691/52:

Art. 51 – Nenhum estabelecimento pode realizar comércio interestadual ou internacional com produtos de origem animal, sem estar registrado no D.I.P.O.A.

Parágrafo único – para efeito de comércio internacional, além do registro, o estabelecimento deverá atender às necessidades técnico-sanitárias fixadas pelo D.I.P.O.A.

Nas premissas do projeto estabelecido entre a Efficientia S. A. e a indústria alimentícia onde o projeto foi implementado se destacam-se: atendimento às normas vigentes; garantia de disponibilidade e confiabilidade; economia no uso de energéticos por meio da melhoria do nível de refrigeração da empresa; aumento da capacidade produtiva; redução de custo operacional e consequente melhoria da competitividade da empresa; redução do impacto ambiental e dos custos de manutenção.

Esquemáticamente o projeto constituiu-se de 4 etapas:

#### *Etapa 1: Projeto e Gestão*

Nessa etapa a equipe da CEMIG e consultores, em conjunto com técnicos da empresa, coletaram os dados de consumo e demanda de energia elétrica, condições operacionais, dados de produção e das cargas instaladas para caracterizar a base de referência e “layout” das instalações.

Com base nos dados levantados foi redimensionado o conjunto de compressores de refrigeração, condensadores, separadores de líquido, além da pressão de trabalho dos compressores. Outros equipamentos como inversores, painéis, acessórios, tubulações e conexões, incluindo obras civis, partes elétricas e mecânicas, foram dimensionados de acordo com os requisitos dos principais equipamentos e fornecedores.

Significativa parcela das informações foi levantada em 2013, no pré-diagnóstico realizado, sendo tendo sido necessário, em 2014, atualização e maior detalhamento para a aquisição dos equipamentos.

#### *Etapa 2: Aquisição dos Materiais e Equipamentos*

Compreendeu o planejamento e preparação do processo de compra e as negociações para aquisição dos equipamentos especificados. O projeto executivo da planta foi realizado nessa etapa, após a definição dos fornecedores e equipamentos adquiridos. A Efficientia acompanhou a fabricação dos equipamentos adquiridos, a preparação do local (obras civis) e a seleção dos instaladores.

#### *Etapa 3: Implantação*

Nessa etapa, foram recebidos, montados e testados os equipamentos. Foi realizado o comissionamento e operação assistida, e também foram treinados os operadores da planta. Para não afetar a continuidade da produção, os materiais e equipamentos foram implantados conforme cronograma aprovado pela Gerência de Produção da empresa.

#### *Etapa 4: Medição, Verificação, Operação e Manutenção*

Foram levantados os dados de geração, produção e de cargas instaladas para caracterizar a situação das instalações após a eficientização. Fez parte dessa etapa a checagem e correção das condições operacionais. A atividade de acompanhamento e controle ocorreu durante todo o período do projeto visando evitar atrasos e desvios não planejados ou previstos.

### 3. METAS E BENEFÍCIOS DO PROJETO

A partir dos resultados levantados in loco, em 2013, foi possível estabelecer, conforme apresentado na Fig. 1, o rateio do consumo de energia global da planta. O mesmo envolvia 62% do total de energia para alimentar equipamentos compressores, responsáveis por sistemas de refrigeração; 3% para iluminação e 35% para equipamentos diversos como bombas, computadores e outras cargas.

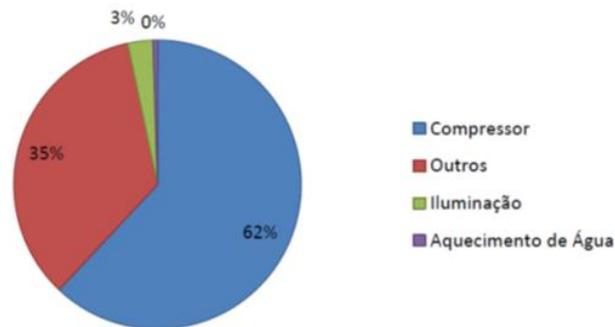


Figura 1: Rateio energético da planta por uso final

Foram registrados mensalmente o consumo e a demanda antes da implantação do projeto. A economia de energia com a implantação do projeto foi afetada pelo aumento da produção e pelas adequações das temperaturas de processos e armazenamento, que ocorreram no decorrer do projeto.

Consoante ao apresentado, depois de realizadas as melhorias na planta, foi necessário avaliar qual era o real consumo de energia por tonelada de refrigeração, parâmetro especialmente importante por não ser influenciado pelo aumento da produção nem pela variação da temperatura ambiente externa. Também, diante da variação das condições de base estabelecidas inicialmente foi necessário realizar análises estatísticas para o levantamento das variáveis que influenciavam no processo. Estes levantamentos serão detalhados ao longo deste documento.

Inicialmente, de acordo com as informações da empresa, as temperaturas estavam acima do limite para o processamento e para o armazenamento de 55.000 frangos por dia. Após a implantação do projeto de efficientização do sistema de refrigeração, a capacidade de produção duplicou. Pelos dados apresentados antes das ações de eficiência energética, o consumo necessário para cada tonelada de refrigeração era de 257.63

kWh/TR, ao passo que o consumo específico encontrado após a implementação do projeto foi de 177.33 kWh/TR, uma queda aproximada de 31% no consumo de energia.

#### **4. DEFINIÇÃO DE UNIVERSO DOS DADOS.**

Seguindo a orientação para a prática do M&V, a estrutura do PIMVP contemplou como descrita a seguir, etapas envolvendo: identificação das variáveis independentes; estabelecimento da fronteira de medição; verificação dos efeitos interativos e dos fatores estáticos; estabelecimento do período de determinação da economia e do procedimento de análise.

##### *Verificação Operacional*

Como meio de verificar o potencial de economia do projeto, optou-se pelo método de verificação operacional de medição instantânea em amostras, conforme item 5.2 do EVO (2014).

Foram realizadas medições pontuais em amostra dos compressores. O parâmetro chave escolhido para esta medição foi a potência de uma amostra de compressores para os quais foram analisados os dados de teste de funcionamento, evidenciando o potencial de eficiência energética da instalação.

##### *Variáveis independentes*

Segundo o Protocolo Internacional de Medição e Verificação 2014 “variável independente é um parâmetro que pode mudar regularmente e causar impacto mensurável no consumo de energia de um sistema ou instalação”. No projeto em questão, os sistemas de refrigeração não continuaram trabalhando com os mesmos perfis de funcionamento. As condições iniciais foram alteradas.

Durante as implantações foram realizados estudos e análises da influência da temperatura ambiente, do volume de produção e de matéria prima processada, das temperaturas dos materiais processados, do tempo ou velocidade dos processos. O objetivo era o de se verificar a influência das variáveis no consumo e demanda de energia. Neste contexto conforme Silva (2009) “Normalmente, na análise é realizada uma correlação com a utilização de energia e ajuste por parte de variáveis independentes, tais como condições meteorológicas, mas comparações simples também podem ser usadas”.

Consoante a isto, no período de medição, foram consideradas as variações, principalmente da temperatura ambiente nos vários períodos do ano. Durante e depois da modificação de equipamentos, foram avaliados os parâmetros temperatura do ambiente, produção e consumo de energia e seus impactos nas medições. A variação da temperatura durante o período foi acompanhada por dados da Organização Meteorológica Mundial (OMM) para a estação de Código: 86790 e Registro: 19 UTC.

#### *Fronteira de medição.*

De acordo com o EVO (2014), a fronteira de medição determina o limite onde serão observados os efeitos da ação de eficiência energética, isolado por medidores, e eventuais efeitos interativos com o resto da instalação.

A economia é determinada por medições no campo dos parâmetros chave. Neste projeto foram utilizadas as medições de energia e demanda do medidor da concessionária e dados climatológicos do Instituto Nacional de Meteorologia. Estes parâmetros definem o uso de energia dos sistemas afetados pela Ação de Eficiência Energética, ou o sucesso do projeto.

Pelo documento de referência, a frequência da medição vai desde o curto prazo a contínua, dependendo das variações esperadas no parâmetro medido e da duração do período de determinação da economia. Neste projeto o processo foi medido em 24 meses. Levando-se em consideração que, ao desenvolver as melhorias de Eficiência Energética deve-se selecionar a opção do EVO (2014) que melhor se enquadre dentro dos procedimentos do referido protocolo, optou-se pela escolha da opção C, sendo correlacionados dados de energia e potência dos equipamentos com parâmetros de produção e temperatura ambiente.

#### *Efeitos Interativos*

Tendo em vista a complexidade das medições envolvidas, os efeitos interativos e seus impactos no processo de medição, conforme ANEEL (2013), os parâmetros que influenciam na produção foram levantados durante as medições. Pela escolha da opção C do EVO (2014) pode-se afirmar que os impactos dos efeitos interativos estavam cercados pela medição.

Um efeito interativo oriundo das ações realizadas, que consta na fronteira de medição, consiste na possível mudança de hábitos dos sujeitos envolvidos no processo, ao serem influenciados pelo projeto. Assim, por meio desta Ação de Eficiência Energética acredita-se que possível conscientizar os envolvidos sobre o consumo.

#### *Fatores estáticos*

Os fatores estáticos são aqueles que podem mudar o padrão de uso da energia e que deverão ser acompanhados nos estudos. Esses regem o uso da energia, mas não há expectativa de que mudem habitualmente, tais como: o tamanho da instalação, a concepção e o funcionamento dos equipamentos instalados, o número semanal de turnos de produção, ou o tipo de ocupantes. Estes fatores foram monitorados para detectar alguma alteração durante o período de determinação da economia.

Conforme já citado é necessário destacar que além da substituição de um equipamento, foram instalados outros equipamentos que melhoraram a performance do sistema, ou seja, toda as ações de eficiência energética foram balizadoras para possibilitar o aumento da produção do sistema.

#### *Período de determinação da economia*

Finalizada a implantação da ação de eficiência energética, a duração do período de determinação da economia deve ser indicada, considerando-se a probabilidade da degradação da economia originalmente obtida ao longo do tempo.

Antes da instalação foram analisados os valores de produção, temperatura média mensal e consumo de energia. Estas variáveis foram acompanhadas durante todo o ano de 2014, ou seja, 12 meses antes da instalação dos equipamentos. Os mesmos dados foram avaliados durante a execução dos projetos, ou seja, entre janeiro de 2015 e fevereiro de 2016. Finalizada a implementação da efficientização do sistema de refrigeração, entre março de 2016 e maio deste mesmo ano, foram realizadas as medições, sendo que estes valores estão indicados na Tabela 1.

#### *Procedimento de análise.*

A análise foi realizada de forma simples, comparando o perfil de consumo, antes e após a instalação dos equipamentos no sistema de refrigeração, sendo os ajustes

realizados, conforme citado anteriormente, considerando o aumento da produção previsto ou medido.

O consumo anterior foi levantado a partir de comparação dos equipamentos instalados e do período de funcionamento no início do projeto, e o consumo posterior foi calculado considerando os dados exigidos no ato de compra.

Tabela 1: Variáveis acompanhadas no projeto

Equipamento/Período		Produção (kg)	Temperatura mensal média (°C)	Consumo (kWh)
Antigo	jan/14	3.428.710	22,7	1.093.744
	fev/14	3.171.048	22,9	980.374
	mar/14	3.421.172	22,7	1.060.152
	abr/14	3.173.153	21,1	1.060.221
	mai/14	3.361.783	19	1.189.474
	jun/14	3.248.263	17,8	1.072.471
	jul/14	3.248.263	17,5	1.179.433
	ago/14	3.095.242	19,4	1.088.043
	set/14	3.196.305	21	1.170.038
	out/14	3.284.317	22,1	1.231.047
	nov/14	3.040.333	22,3	1.152.680
	dez/14	3.310.569	22,4	1.182.785
Novo	jan/15	3.351.526	23,5	1.182.358
	fev/15	2.768.321	23,3	979.278
	mar/15	3.524.730	23,2	1.164.840
	abr/15	3.170.469	21,3	1.017.043
	mai/15	3.459.354	19,5	1.115.832
	jun/15	3.351.105	18,6	1.059.064
	jul/15	3.506.807	18,6	1.047.770
	out/15	3.413.008	18,6	1.136.214
	nov/15	3.622.744	20,7	1.107.075
	dez/15	3.753.509	22,5	1.224.602
	jan/16	3.967.449	22,8	1.267.396
	fev/16	4.022.846	22,9	1.278.286
	mar/16	4.216.545	22,7	1.175.857
	abr/16	3.773.618	21	1.110.698
	mai/16	4.604.687	22,7	1.199.421
Média		3.462.440	21,2	1.130.600
Desvio Padrão		390351	1,9	80553
Coef. De Variação		0,1127	0,0892	0,0712

De posse dos dados apresentados na Tabela 1, os mesmos foram aferidos e serviram de referência para cálculos dos valores de economia.

## 5. ESTUDO PRELIMINAR DOS DADOS: REGRESSÕES

Neste estudo foram acompanhados dados de produção (kg), de consumo de energia (kWh) e de temperatura (°C) dispostos na Tabela 1. As modificações propostas nos equipamentos da empresa visaram melhorar a produção e adequar de forma eficiente o consumo de energia.

A caracterização da evolução das variáveis acompanhadas pelo estudo proposto pode ser verificada pelas Fig. 2, Fig. 3 e Fig. 4.

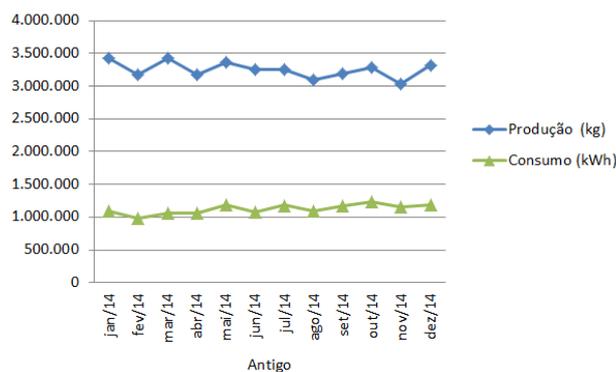


Figura 2: Produção e consumo sem modificações de equipamentos

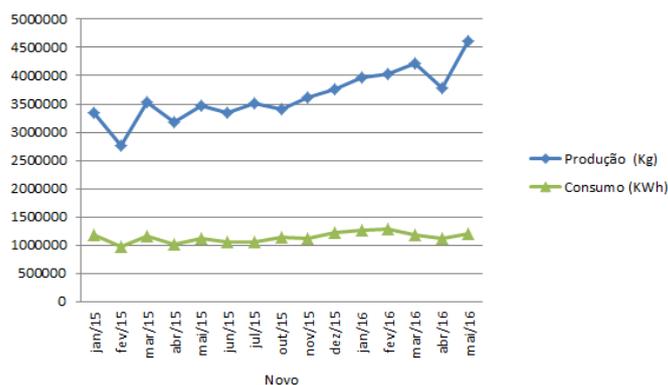


Figura 3: Produção e consumo com modificações de equipamentos

Na Fig. 2 e na Fig. 3 apresentam-se a variação do consumo e da produção no período contemplado pelo projeto. Por elas percebe-se que entre os anos de 2014 e 2016, houve um crescimento da produção chegando ao pico de 4.6 Toneladas em maio de 2016,

valor 15% superior se comparado com mesmo período do ano anterior. A análise desta variação é especialmente importante se forem avaliados os aspectos:

- Entre dezembro de 2014 e Janeiro de 2015 foi iniciada a modificação de equipamentos que possibilitaram a melhoria da eficiência do sistema de refrigeração, reduzindo em 31% o consumo de energia específico.
- Após Janeiro de 2015 a produção aumentou, de acordo com a Fig.3, significativamente.



Figura 4: Temperatura média mensal (°C)

No estudo proposto houve o interesse em se acompanhar a influência entre as variáveis de estudo, a saber: produção, consumo de energia e temperatura do ambiente externo às câmaras.

Na Fig. 4 apresenta-se a variação da temperatura no período da aferição dos resultados. Há que se ressaltar o ano 2015 apresentou valores de temperatura maiores que nos outros anos medidos.

Com o objetivo de modelar, investigar e identificar como o comportamento de uma das variáveis poderia mudar o comportamento de outras foi utilizada a análise de regressão linear simples para a análise da relação entre as variáveis (produção e consumo de energia) e também entre as variáveis (temperatura e consumo de energia). Em ambos os casos objetivou-se estudar a influência sobre a variável de resposta: consumo de energia.

Os testes hipótese para a regressão linear foram elaborados em consonância com MONTGOMERY (1991):

$$TH: \begin{cases} H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0 \\ H_1: \beta_1 \neq 0 \text{ ou } \beta_2 \neq 0 \end{cases}$$

Considerando-se:

- $H_0$  a hipótese nula que indica a ausência de correlação entre as variáveis analisadas.
- $H_1$  a hipótese alternativa que indica a existência de correlação entre as variáveis analisadas.

Os resultados dos testes de Regressão Linear para as relações entre as grandezas encontram-se registrados nas Tabelas 2 e 3.

TABELA 2: REGRESSÃO LINEAR ENTRE PRODUÇÃO E CONSUMO

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,556508302
R-Quadrado	0,30970149
R-quadrado ajustado	0,283151548
Erro padrão	66926,41988
Observações	28

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de</i> <i>significação</i>
Regressão	1	52248628478	52248628478	11,66486474	0,002101593
Resíduo	26	1,16458E+11	4479145678		
Total	27	1,68706E+11			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>
Interseção	732971,6177	117107,6243	6,258957283
Produção (Kg)	0,114840475	0,033624445	3,41538647

<i>valor-P</i>	<i>95%</i> <i>inferiores</i>	<i>95%</i> <i>superiores</i>	<i>Inferior</i> <i>95,0%</i>	<i>Superior</i> <i>95,0%</i>
1,26669E-06	492253,4486	973689,7869	492253,4486	973689,7869
0,002101593	0,045724438	0,183956512	0,045724438	0,183956512

Testada a hipótese de regressão entre a produção e o consumo de energia, pelo teste F, verifica-se que  $F_{\text{calculado}} = 11.66$  enquanto que pela Distribuição F de Snedecor,  $F_{\text{crítico}} = 4.20$ . Como  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$ , a hipótese nula foi rejeitada, havendo evidências estatísticas de correlação significativa entre a variável produção e o consumo de energia.

Também, os resultados da análise de variância (ANOVA) fornecem valor-P de 0.0021 para a análise de correlação entre a produção e o consumo de energia. Considerando-se que o nível de significância proposto no projeto foi de 0.05, como  $0.0021 < 0.05$ , houve evidências estatísticas com 5% de significância para se rejeitar  $H_0$  e indicar que o consumo de energia é afetado pela produção.

Em relação à análise do teste de regressão entre a temperatura e o consumo de energia, conforme apresentado na Tabela 3, verifica-se que  $F_{\text{calculado}} = 0.99$ . Pela

Distribuição F de Snedecor,  $F_{\text{crítico}} = 4.20$ . Como  $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$ , não houve evidências estatísticas para se rejeitar  $H_0$  e indicar que não exista correlação significativa entre a temperatura e o consumo de energia. Situação confirmada também pelo valor-P = 0.3291 > 0.05.

TABELA 3: REGRESSÃO LINEAR ENTRE TEMPERATURA E CONSUMO

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,195219372
R-Quadrado	0,038110603
R-quadrado ajustado	-0,000364973
Erro padrão	80567,21736
Observações	27

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	6,43E+09	6,43E+09	0,990514	0,32915278
Resíduo	25	1,62E+11	6,49E+09		
Total	26	1,69E+11			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>
Intersecção	954237,0749	177882,297	5,364429686
Temperatura Mensal Média (°C)	8313,189697	8352,901198	0,995245784

<i>valor-P</i>	<i>95% inferiores</i>	<i>95% superiores</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
1,45587E-05	587881,6262	1320592,523	587881,6262	1320592,523
0,32915278	-8889,932347	25516,31174	-8889,932347	25516,31174

Realizou-se também teste Regressão Linear Múltipla para o estudo da correlação da variável de resposta consumo de energia com as variáveis produção e temperatura. Os resultados deste teste são indicados na Tabela 4. Neste caso, como  $F_{\text{significação}}$ , nível de significância em que se aceita a hipótese nula da regressão, vale 0.0109, é menor que o nível de significância do projeto, 0.05, houve evidências estatísticas para se rejeitar a hipótese nula de regressão. Testada a hipótese nula dos regressores, verifica-se o valor P para a intersecção vale  $0.0007 < 0.05$ , o valor P para a Produção vale  $0.0048 < 0.05$  e o valor P para a temperatura vale  $0.7098 > 0.05$ . Pelos testes houve evidências estatísticas para rejeitar a hipótese nula para a intersecção e para a produção, contudo não houve evidências para se rejeitar a hipótese nula da temperatura.

TABELA 4: REGRESSÃO MÚLTIPLA ENTRE PRODUÇÃO, TEMPERATURA E CONSUMO

Estatística de regressão				
R múltiplo		0,560138643		
R-Quadrado		0,3137553		
R-quadrado ajustado		0,256568242		
Erro padrão		69454,38669		
Observações		27		

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	52932532178	26466266089	5,486473845	0,010908073
Resíduo	24	1,15774E+11	4823911830		
Total	26	1,68706E+11			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t
Interseção	684957,451	176173,2835	3,887975733
Produção (Kg)	0,111596248	0,035942531	3,104852261
Temperatura mensal média (°C)	2792,723234	7417,031139	0,376528449

valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
0,000698987	321353,6646	1048561,237	321353,6646	1048561,237
0,004830936	0,037414511	0,185777986	0,037414511	0,185777986
0,70983243	-12515,27667	18100,72313	-12515,27667	18100,72313

Sendo o consumo de energia a variável dependente, para as regressões envolvendo as variáveis produção e temperatura, obteve-se pela Tabela 2 o valor R-Quadrado = 0.3097, pela Tabela 3 o valor R-Quadrado = 0.0381 e pela Tabela 4 o valor R-Quadrado = 0.3137. Esses resultados indicam que 30.97% da variação do consumo de energia são explicados pela produção, 3.81% pela temperatura e 31.37% pela variação combinada entre a produção e a temperatura.

## 6. ANÁLISE DOS DADOS: ANOVA FATORIAL

Outro aspecto analisado no projeto refere-se ao estudo estatístico das modificações propostas nos equipamentos da empresa visando melhorar a produção e adequar de forma eficiente o consumo de energia. Esse estudo foi realizado a partir do modelo linear estatístico para experimento com um único fator:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad \text{com } \{i = 1,2.\}$$

Onde:

- $\mu$  o efeito médio global do fator consumo de energia ou produção;
- $\tau_i$  o efeito do  $i$ -ésimo nível do fator equipamento;

- $i$  representa o número de níveis do fator consumo de energia ou produção;
- $j$  representa o número de níveis do fator equipamento.

Nessa análise, a variabilidade total os dados da amostra foi dividida em dois componentes: os dados do processo antigo, antes das modificações de equipamentos e os dados do processo novo, com a modificação dos equipamentos. Destaca-se que não foram descartados os dados coletados durante o processo de implantação.

Para o teste de hipótese foram testadas a igualdade das médias nos níveis equipamento antigo e equipamento novo para os fatores produção e consumo de energia:

$$TH: \begin{cases} H_0: \tau_1 = \tau_2 = 0 \\ H_1: \tau_1 \neq 0 \text{ ou } \tau_2 \neq 0 \end{cases}$$

*Teste ANOVA para a análise da produção em função do equipamento antigo e do novo*

Na Fig. 4 apresentam-se os boxplots para os dados da produção antes e depois da modificação dos equipamentos.

Observando-se as caixas que envolvem o segundo e o terceiro quartil amostral, percebe-se significativa variância dos dados para o equipamento novo, situação justificada pelo processo de inserção de um novo modelo e que deve ser regularizado por ajustes no processo. Como as caixas apresentam interseção, não é possível avaliar se existe uma diferença real da produção frente à mudança de equipamento, sendo sugerida a aplicação da ANOVA.

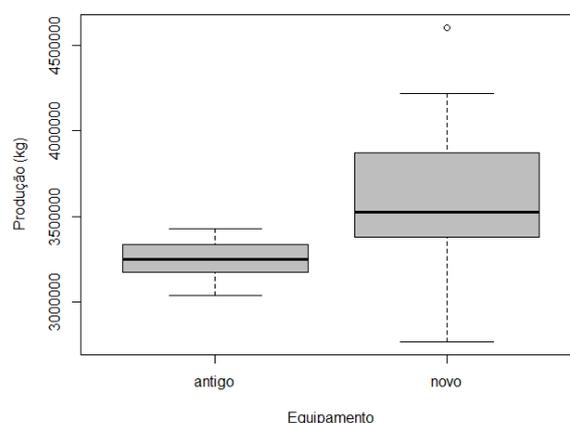


Figura 4: Produção em função dos equipamentos

O modelo de assume que as observações são independentes e normalmente distribuídas com a mesma variância para cada tratamento. Assim, os pressupostos para a

utilização da ANOVA envolvem a verificação da normalidade, da homocedasticidade e da independência para os dados:

*Normalidade:*

A partir dos dados disponibilizados na Tabela 5, como resultado da aplicação do teste de Shapiro-Wilk obteve-se P-valor = 0.1035. Considerando-se o nível de significância de 0.05, como P-valor > 0.05, percebe-se existência de padrão de normalidade. Também, pela Fig. 5, percebe-se que gráfico de probabilidade normal dos resíduos do experimento apresenta uma configuração de pontos que se aproxima de uma reta, o que evidencia que os resíduos apresentam distribuição normal.

TABELA 5: TESTE SHAPIRO-WILK PARA A PRODUÇÃO

---

Shapiro-wilk normality test
data: model1\$residuals
w = 0.93712, p-value = 0.1035

---

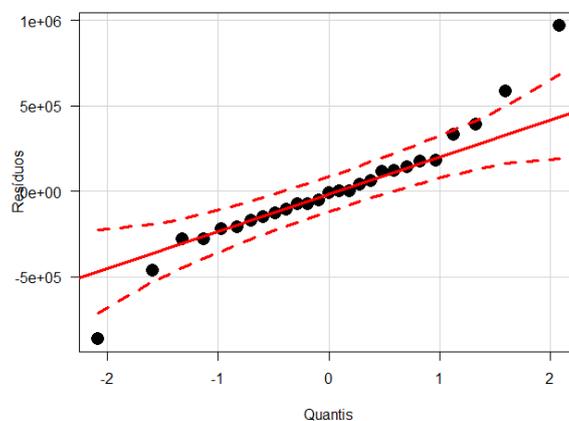


Figura 5: Normalidade para a produção

*Homocedasticidade:*

A ocorrência de variâncias constantes nos resíduos relaciona-se com a homocedasticidade. Se os resíduos não estão distribuídos ao longo da linha de regressão em torno de todo o intervalo de observações, o pressuposto da variância constante é

violado. Pela Fig.6, o estudo residual dos erros não evidencia a existência de um padrão para a mudança de nível, resultado também obtido pelo teste de Fligner, na Tabela 6.

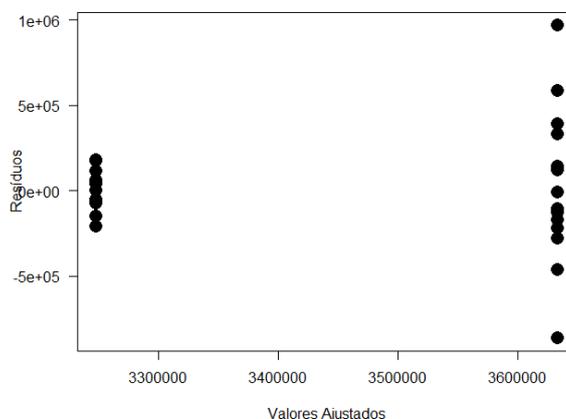


Figura 6. Homocedasticidade para a produção

TABELA 6: TESTE FLIGNER PARA A PRODUÇÃO

---

```
Fligner-Killeen test of homogeneity of variances
data:  producao by equipamento
Fligner-Killeen: med chi-squared = 6.0574, df = 1, p-value =
0.01385
```

---

### *Independência:*

Pressuposto fundamental para a aplicação da ANOVA. A validade da suposição de independência pode ser verificada por meio do gráfico de resíduos contra o tempo (ordem de coleta das observações). Se neste gráfico os resíduos estiverem situados, aproximadamente, em torno de uma faixa horizontal, então será obtida uma indicação da validade da suposição de independência. A validade do pressuposto da independência é verificada na Fig. 7. A aleatoriedade nos dados se evidencia também, conforme Tabela 7, pelo teste de Durbin-Watson.

TABELA 7: TESTE DURBIN-WATSON PARA A PRODUÇÃO

---

```
> durbinWatsonTest(modell)
lag Autocorrelation D-W Statistic p-value
1 0.3760971 0.919549 0
Alternative hypothesis: rho != 0
```

---

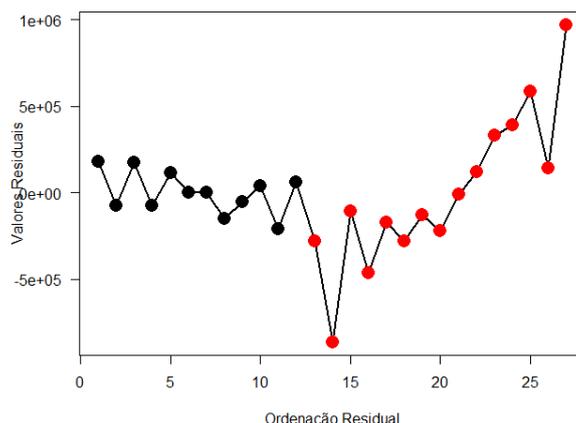


Figura 7: Aleatoriedade para a produção

Verifica-se pelas explicações supracitadas que os três pressupostos foram atendidos, possibilitando a aplicação do teste ANOVA, com resultados apresentados na Tabela 8.

TABELA 8: RESULTADOS ANOVA PARA A PRODUÇÃO

```
> summary.aov(model1)
          Df    Sum Sq   Mean Sq F value Pr(>F)
equipamento  1 9.908e+11 9.908e+11  8.338 0.0079 **
Residuals   25 2.971e+12 1.188e+11
```

Pela hipótese nula considera-se que a mudança no equipamento não alterou a produção. Já pela hipótese alternativa sinaliza-se que a alteração no equipamento acarretou alguma mudança para a produção. A partir dos resultados obtidos com o teste ANOVA conclui-se que os efeitos principais do tipo de equipamento afetam a produção, visto que a tabela ANOVA fornece  $F_0 = 8,338$  que recai na região crítica da curva F de Snedecor a 5%,  $F_{\text{crítico}} = 4.20$ .

O resultado da aplicação do teste ANOVA também pode ser acompanhado na Fig. 8. O valor F obtido pelo teste ANOVA encontra-se na região de rejeição (linha pontilhada). Assim, ao nível de significância de 5%, há evidências estatísticas que evidenciam que a mudança de equipamento contribuiu para mudanças na produção.

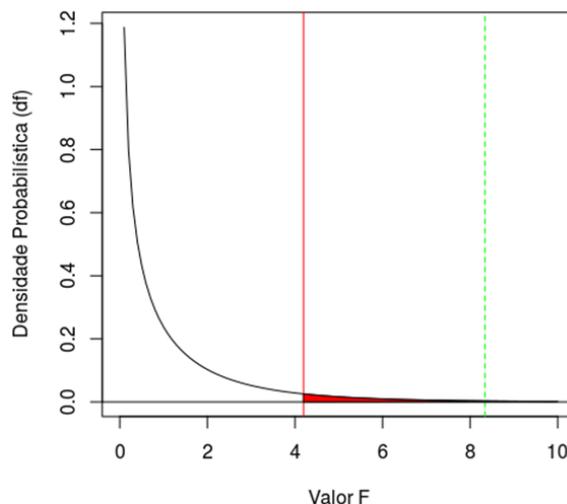


Figura 8. Distribuição F de Fisher para a produção

Com o interesse de se avaliar a diferença na produção a partir da mudança de equipamento aplicou-se o teste de Tukey.

Na última coluna do teste ANOVA apresentado na Tabela 8, tem-se que para as estatísticas de teste o valor-P = 0.0079, que é consideravelmente menor que o nível de significância 0.05. A hipótese nula foi rejeitada e a hipótese alternativa foi apoiada. A situação indica a possibilidade de obtenção resultados para a diferenciação entre médias antes e após a modificação nos equipamentos com a aplicação do teste de Tukey.

Por este teste, ao nível de significância de 5%, verifica-se que existe diferença significativa da produção ao se fazer a modificação de equipamento, sendo que o equipamento novo contribuiu para o aumento na produção, situação representada na Fig. 9 e também na Tabela 9.

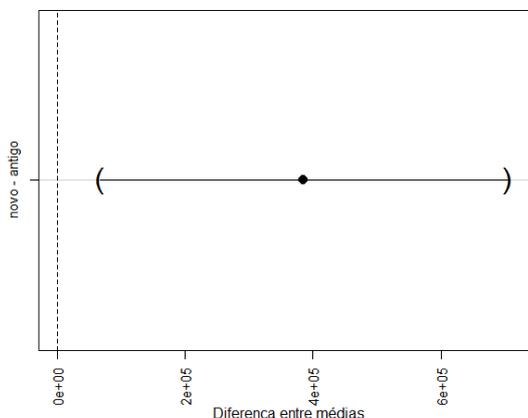


Figura 9. Comparação entre médias para a produção

TABELA 9: TESTE DE TUKEY PARA A PRODUÇÃO

---

```
Simultaneous Tests for General Linear Hypotheses
Multiple Comparisons of Means: Tukey Contrasts

Fit: aov(formula = producao ~ equipamento, data = fator)

Linear Hypotheses:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
novo - antigo == 0  385518    133512  2.888  0.0079 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Adjusted p values reported -- single-step method)
```

---

*Teste ANOVA para a análise do consumo em função do equipamento antigo e do novo*

Foi realizada também a análise estatística para se verificar a existência de variações no consumo de energia elétrica em virtude de alterações de equipamentos.

Para a análise do comportamento do consumo de energia, frente à alteração de equipamentos, em relação aos boxplots obtidos, observa-se na Fig. 10 a sobreposição entre os dados relativos ao consumo para as duas situações de equipamento, o que indica a necessidade da validação via o teste ANOVA.

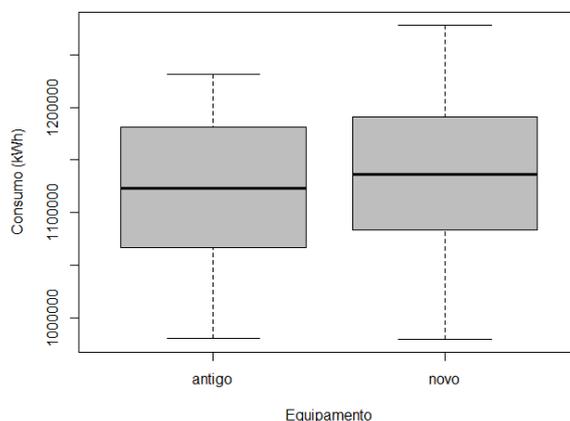


Figura 10: Consumo de energia em função dos equipamentos

Para a análise da situação em estudo as três premissas foram atendidas, possibilitando a aplicação do teste;

- Em relação à normalidade dos dados, conforme apresentado na Fig. 11, o qqplot apresenta uma configuração de pontos que se aproxima de uma reta, indicando padrão de normalidade;

- Sobre a independência, na Fig. 13, ao se plotar o gráfico de resíduos percebe-se a aleatoriedade nos dados;
- Na Fig. 12 não se observa a existência de um padrão para a mudança de nível, o que indica atendimento da homocedasticidade para a situação.

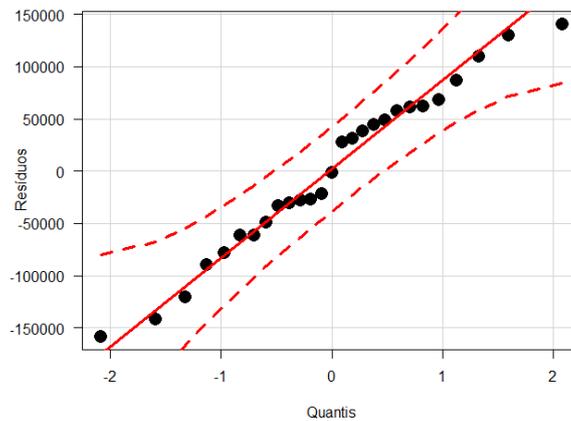


Figura 11: Normalidade para o consumo de energia

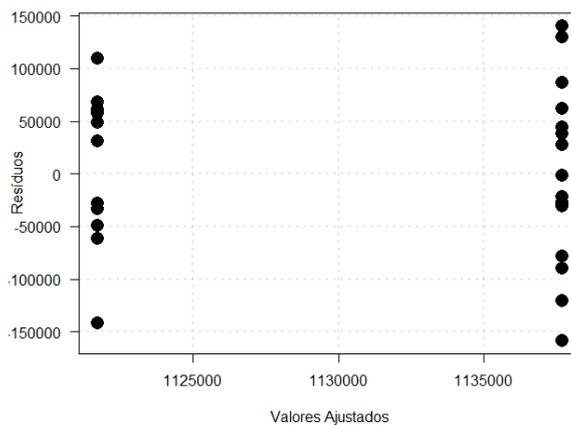


Figura 12: Homocedasticidade para o consumo de energia

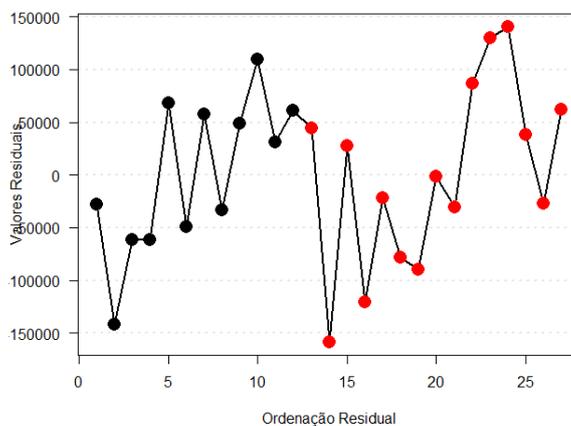


Figura 13: Aleatoriedade para o consumo de energia

Ressalta-se que a realização dos testes Shapiro–Wilk (para normalidade), Fligner (para a homocedasticidade) e Durbin – Watson (para a aleatoriedade) contemplaram as análises observadas, conforme se pode acompanhar pela Tabela 10.

TABELA 10: TESTES DE SHAPIRO-WILK, FLIGNER-KILLEEN E DURBIN-WATSON PARA O CONSUMO DE ENERGIA

---

```
Shapiro-Wilk normality test
data:  model1$residuals
W = 0.97525, p-value = 0.7431
```

---

```
Fligner-Killeen test of homogeneity of variances
data:  kwh by equipamento
Fligner-Killeen: med chi-squared = 0.12108, df = 1, p-value
= 0.7279
```

---

```
> durbinWatsonTest(model1)
lag Autocorrelation D-W Statistic p-value
1      0.2531918      1.466135  0.092
Alternative hypothesis: rho != 0
```

---

Aplicando-se o teste ANOVA, conforme a Tabela 11 obtém-se para  $F_0$  o valor 0.256. O cálculo do valor F na tabela da distribuição F para 5% de significância, aplicado aos dados do problema é valor  $F = 4.20$ . Como  $F_0 < \text{valor } F$ , não há evidências estatísticas para se rejeitar a hipótese nula.

TABELA 11: RESULTADOS ANOVA PARA O CONSUMO DE ENERGIA

---

```
> summary.aov(model1)
      Df    Sum Sq   Mean Sq F value Pr(>F)
equipamento  1 1.709e+09 1.709e+09  0.256  0.617
Residuals    25 1.670e+11 6.680e+09
```

---

Os resultados expressos na Tabela 11 também podem ser observados pela Fig. 14.

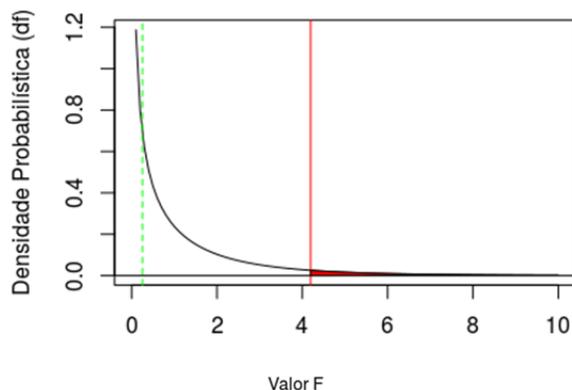


Figura 14: Distribuição F de Fisher para o consumo de energia

A aplicação do teste de Tukey não possibilitou verificar a existência de diferença significativa para o consumo de energia elétrica em função do tipo de equipamento, o que se observa pela Fig. 15. Esta situação já era prevista, haja vista que pelo teste ANOVA não houve evidências estatísticas, ao nível de significância de 5%, para rejeitar a hipótese nula.

TABELA 12: TESTE DE TUKEY PARA O CONSUMO DE ENERGIA

---

Simultaneous Tests for General Linear Hypotheses

Multiple Comparisons of Means: Tukey Contrasts

Fit: aov(formula = kwh ~ equipamento, data = fator)

Linear Hypotheses:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
novo - antigo == 0	16010	31654	0.506	0.617

(Adjusted p values reported -- single-step method)

---

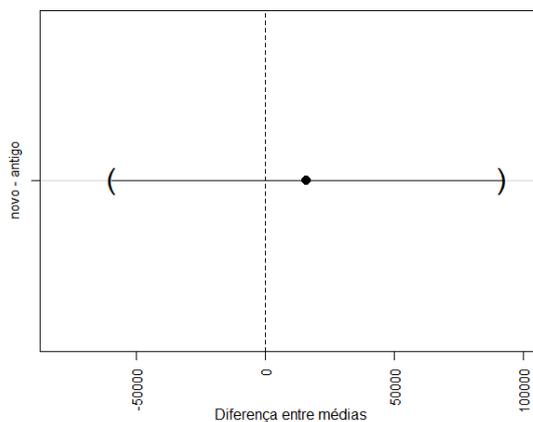


Figura 15: Comparação entre médias para o consumo de energia

## 7. CONCLUSÃO

Neste artigo é proposta a aferição estatística dos ganhos obtidos por meios de intervenções em uma indústria alimentícia. Inicialmente, a partir da necessidade apresentada pela indústria alimentícia, usando experimentos planejados foram determinadas as variáveis do processo que possuíam maior influência na melhoria da produção e na redução do consumo de energia do túnel de congelamento da planta.

O mapeamento da situação inicial da planta forneceu dados que contribuíram para a colocação da hipótese de que alterações e melhoria nos equipamentos levariam a empresa a alcançar os objetivos desejados. Considerando-se também que por se tratar de refrigeração, pelas teorias termodinâmicas, existem vários influenciadores no consumo de energia.

Por meio de regressões foi mapeado que aproximadamente 30% do consumo de energia da empresa, com refrigeração, relacionava-se com variações da quantidade de produto produzido e da temperatura ambiente.

Contudo, em um projeto que almeja melhoria no processo de eficiência de uma planta é necessário avaliar até onde a troca de equipamentos provocou a real eficiência e até onde as variáveis independentes influenciaram no processo, limiar este que apenas com a regressão não foi possível identificar. Por meio do software R, o teste ANOVA para justificar a existência de evidências estatísticas que validaram o alcance dos objetivos do projeto. A aplicação do teste indicou que há evidências estatísticas que possibilitam a verificação do aumento da produção pelas alterações nos equipamentos da empresa, não havendo, contudo, evidências estatísticas de que o consumo de energia tenha sido influenciado pelas alterações dos equipamentos.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - **Procedimentos do Programa de Eficiência Energética - PROPEE**. 10 Módulos. Brasília - DF: ANEEL, 2013.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - **Relatório de M&V - Iluminação**. Brasília - DF: ANEEL, 2013.

- EVO - EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance - **Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água** - vol. 1 - EVO 10000 - 1:2012 (Br). Sofia: EVO, 2014.
- ICF INTERNATIONAL, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO (PUC-RIO), JORDÃO ENGENHARIA. **Estabelecimento de requisitos mínimos de medição e verificação de resultados que possam ser aplicados aos projetos de eficiência energética desenvolvidos pelas distribuidoras**. Preparado para o Instituto “ABRADEE” da Energia, com o apoio da FUPAI. Rio de Janeiro, nov. 2011.
- SANTOS, A. H. M.; SIMÕES, A. A.; HADDAD, J. et.al. Conservação de Energia - **Eficiência Energética de Equipamentos**. Fupai 3ª edição. Itajubá 2006.
- TONIM, G. A gestão de energia elétrica na indústria – seu suprimento e uso eficiente. **Dissertação de Mestrado** - São Paulo, 2009. 112p
- ERNEST e YOUNG e FGV Projetos. **“Estudo Econômico”**, Site FGV (2008).
- JUNIOR, C. C. F. Integração energética da etapa de extração de óleo de soja utilizando análise pinch. 2009. 80f. **Dissertação (Mestrado em engenharia química)**. - Universidade Federal do Oeste do Paraná, Paraná, Toledo, 2009.
- CIMA, E. G.; OPAZO, M. A. U. Sistemas de controle de qualidade: uma análise da agroindústria avícola. **Revista da FAE**, v. 12, n. 1, 2016.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Sixth Edition, 2005.