

Programa em Linguagem SCILAB para Avaliação Técnico-Econômica da Troca de Motores em uma Indústria

Anuar Bezerra Ferreira
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido
Mossoró, Brasil
anuarfer@gmail.com

Resumo—O trabalho apresenta uma avaliação técnico-econômica da viabilidade de trocas, de motores de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo com baixo rendimento, por motores de rendimento IR3, como também o desenvolvimento de um programa em SCILAB para automatização dessa avaliação, utilizando o método da análise de custo de ciclo de vida. É oferecido todo o referencial teórico necessário para o entendimento desse método. No fim, o programa desenvolvido é explicado e são apresentados os resultados da análise.

Palavras-chave—eficiência energética, LCC, motor de indução, valor presente

I. INTRODUÇÃO

Com o crescimento do consumo energético no Brasil, o país tem se voltado cada vez mais para ações que visam melhorar a eficiência energética no seu território.

Em 2019, o consumo de energia elétrica em indústrias correspondia a cerca de 35,9% do consumo total do Brasil [2], e em 2003, os motores de indução magnética trifásicos com rotor gaiola de esquilo (MITRGE) representavam mais 90% do consumo dos motores elétricos do país. Com isso, o MITRGE demonstra fazer parte de uma grande parcela do uso da matriz energética nacional [5].

Atualmente, o Brasil passa por uma transição gradual de troca de motores de indução trifásicos de menores rendimentos, para motores de maiores rendimentos. A portaria Interministerial MME/MCT/MDIC 553 de 8 de dezembro de 2005, estabeleceu níveis mínimos para rendimentos de motores de indução trifásicos fabricados no Brasil, porém alguns fatores como a prática de recondicionamento deixaram como consequência uma grande população de motores ~~no país~~ com rendimentos baixos ou desconhecidos [7]. Com a instituição da portaria nº 1 de 29 de junho de 2017, foi determinado o nível de rendimento mínimo IR3 para motores de indução trifásicos com rotor gaiola de esquilo, comercializados no país a partir de agosto de 2019 [9].

Juntando os fatores previamente citados com a modernização de motores, o preço crescente da energia elétrica e a demanda por ações que visam o melhor aproveitamento de energia em prol do meio ambiente, surge uma grande necessidade da substituição de motores com rendimentos baixos ou desconhecidos por motores de rendimento IR3.

A realização dessa troca pode ser um trabalho bastante complexo e minucioso, pois para que a sua viabilidade econômica seja analisada, várias questões precisam ser consideradas, como a energia que será economizada, a vida útil do motor, custos com manutenção e descarte, e o investimento necessário, além da desvalorização da moeda com o passar do tempo [3].

Usualmente, ações que tem como objetivo atingir um melhor aproveitamento energético exigem grandes investimentos à longo prazo, e para isso, os métodos convencionais de análise como *payback* simples e *payback* descontado podem não ser adequados para uma avaliação profunda, já que não consideram diversos fatores envolvidos na vida útil desses investimentos.

A análise de custo de ciclo de vida (LCC) é um método de avaliação de investimentos capaz de considerar uma grande quantidade de fatores necessários para testar a viabilidade de um projeto, desde o somatório dos custos previstos ao longo do tempo à capacidade de aproximar esses custos ao valor atual, e assim obter uma análise mais próxima à realidade [4].

Com isso, este trabalho visa fazer uma avaliação técnico-econômica de um projeto de troca de MITRGEs de baixo rendimento por motores de alto rendimento, em um parque fabril de médio porte, utilizando o método de análise de custo de ciclo de vida, através do desenvolvimento de um programa em SCILAB a fim de gerar um registro de programa de computador junto ao INPI. O presente trabalho foi elaborado com base em [7], que contém um estudo com as informações necessárias para a análise, como também, a estrutura lógica de um programa com a mesma finalidade. Assim como em [7], as informações referentes aos motores serão extraídas do parque fabril apresentado no estudo de [8]. No fim, os resultados da simulação serão comparados com os de [7], nas mesmas condições, para atestar a funcionalidade do programa.

II. CARREGAMENTO E RENDIMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (MIT)

O entendimento sobre o carregamento e rendimento, bem como a relação entre os dois é de suma importância para projetos que envolvem o dimensionamento de motores e a eficiência energética relacionados a estes.

O rendimento é dependente direto da corrente de estator, do escorregamento e das perdas suplementares associadas ao

funcionamento do motor. A equação 1 mostra como é possível calculá-lo:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (1)$$

Onde:

η – Rendimento;

$P_{saída}$ – Potência de saída aproveitada pelo motor, conhecida também como potência de eixo;

$P_{entrada}$ – Potência de entrada, representa a potência real consumida pelo motor, distinta da potência nominal.

A equação 2 é uma variação de (1), na qual é possível encontrar a potência no eixo:

$$P_{eixo} = \eta \cdot P_{entrada} \quad (2)$$

Já o carregamento, é encontrado pela relação entre a potência nominal e a potência de saída, como é mostrado em (3):

$$L = \frac{P_{eixo}}{P_n} \quad (3)$$

Assim, o carregamento e o rendimento são dependentes também entre si [7].

III. ANÁLISE DE CUSTO DE CICLO DE VIDA (LCC)

A Análise de Custo de Ciclo de Vida (Life Cycle Cost - LCC) é um método econômico de avaliação que explora todos os custos relevantes, possíveis de mensurar, que envolvem um projeto durante um tempo determinado. Este tempo pode ser toda a sua vida útil ou um período de interesse a ser estudado. É aplicável em qualquer situação que haja alternativas de investimentos nos quais gastos iniciais mais altos possam justificar menores custos futuros, onde será analisada aquela que mais compensa.

É bastante apropriada para a avaliação de projetos de conservação de energia, onde é comum existirem opções que exigem uma maior aplicação de capital, para que haja uma maior economia de energia. A análise LCC considera, além da energia consumida e o seu valor, todos os custos associados a cada opção, é capaz de determinar quais são viáveis, e ainda, de quantificar suas viabilidades. Ou seja, revela se um investimento mais alto em um projeto é compensado pela redução nos seus custos durante o tempo de estudo, e ainda, qual das alternativas de investimento é a que mais compensa.

Para conseguir um resultado preciso, é necessário ter em mãos uma grande quantidade de informações detalhadas sobre o ciclo de vida do projeto e uma boa compreensão dos dados para definir suas relevâncias, tornando a análise mais subjetiva em casos complexos. Assim, muitas vezes é exigido um esforço maior para obter e avaliar estas informações do que para os cálculos em si. Além disso, o analista precisa ter um certo conhecimento nos conceitos de valor presente para trabalhar com valores atuais, já que na maioria das análises, os períodos futuros estudados são na escala de anos, onde ocorrem variações no valor da moeda e pode ocorrer mudança no valor de um produto ou commodities para além da inflação, como acontece no caso da energia elétrica, que por depender de diversos fatores a mais, as variações do seu

preço não acompanham apenas a valorização ou desvalorização da moeda.

Em diversas ocasiões, o investidor possui um orçamento limitado para os investimentos que se deseja fazer e precisa escolher para quais irá destinar seu capital. Assim, é preciso fazer análises de perspectivas diferentes na avaliação dos projetos e incluir comparações tanto entre alternativas que tenham a mesma finalidade, como também, alternativas de projetos independentes, para que se possa considerar as consequências de cada investimento e o indivíduo ou instituição poder definir suas prioridades a partir disso. Para essas necessidades, existem alguns métodos complementares que podem ser aplicados na análise LCC, como a Net Savings (NS) e o Energy Savings (ES) [4], que serão explicados mais adiante.

A. Valor Presente

Quando se vai analisar qualquer tipo de fluxo de caixa, seja positivo ou negativo, deve-se ser sensível ao momento em que o fluxo ocorre. Normalmente, é preferível que um montante seja recebido ou economizado (fluxo de caixa positivo) o quanto antes, em vez de ser em um momento no futuro, mesmo que o valor total monetário seja o mesmo. Assim como fazer um pagamento ou assumir um custo (fluxo de caixa negativo) muitas vezes é melhor que seja feito no futuro do que no presente, caso o valor em dinheiro se conserve. Isso acontece porque normalmente o valor de uma moeda cai ao longo do tempo, além do fato de que diversos custos sofrem alterações de valores além da desvalorização da moeda.

No caso de um investidor, a lógica não é diferente, e ainda é reforçada pelo fato de se poder aplicar o valor do fluxo de caixa e obter retornos adicionais. Com isso, em análises de investimentos é sempre interessante se trabalhar com valores na mesma base monetária, ou seja, fluxos de caixa representados no mesmo instante de tempo, para se ter uma noção real dos valores dessas quantias, principalmente para longos períodos de estudo [4].

Segundo [1], o valor presente é uma ferramenta, utilizável na análise LCC, que consiste na atualização dos valores monetários para uma data em comum, que normalmente é a data inicial do projeto, permitindo uma análise apropriada dos custos e benefícios que ocorrem no decorrer do tempo de estudo. O investimento inicial mais alto em um projeto deve ser vantajoso quando seus benefícios, descontados a uma taxa que os converta em valores do momento do investimento, recompe a aplicação inicial e os custos futuros, também convertidos para o mesmo momento. Para o investidor, esta taxa torna indiferente o instante em que acontece o fluxo de caixa, já que ele pode saber apenas o quão vale aquele montante em valor presente, o que o possibilita um entendimento mais simples e adequado.

Dois conceitos inerentes ao entendimento do Valor Presente é o da taxa de desconto e, principalmente em projetos de eficiência energética, o da taxa de escalada. A primeira refere-se à um número percentual, que indica a desvalorização de uma quantia em cada período definido. Existem diferentes formas de calculá-lo para as diferentes utilidades, mas em projetos de eficiência energética, a ANEEL define uma taxa de 12% ao ano. A taxa de escalada é utilizada em análises que envolvem custos que variam além da desvalorização da moeda, como é o caso da energia

elétrica, que sua variação depende de diversos outros fatores e seu valor costuma ter um aumento acumulado maior que a inflação. É calculado a partir dessa variação em períodos anteriores ao estudo, para o tipo de custo específico a ser analisado.

Para o início da compreensão matemática do Valor Presente, pode ser usada a lógica do cálculo de juros compostos. Tal cálculo encontra o valor do retorno futuro acumulado, após um tempo determinado, de um montante aplicado à uma certa taxa de juros através de (4).

$$P_t = P_0(1 + i)^t \quad (4)$$

Onde:

P_t – Valor acumulado com a aplicação após um período t .

P_0 – Valor do investimento.

i – Taxa de juros aplicada.

t – Tempo após o investimento.

Por consequência, sabendo o valor acumulado, a taxa de juros aplicada no investimento a cada período, e o tempo desta aplicação, é possível encontrar o investimento que seria necessário para essas condições pela equação 5. Nesse caso, descobre-se o valor resultante, após o valor P_t ser descontado à uma taxa i , em uma quantidade de períodos t .

$$P_0 = \frac{P_t}{(1+i)^t} \quad (5)$$

De forma análoga, a fórmula geral para o Valor Presente é dada por (6).

$$PV = \frac{F_t}{(1+d)^t} \quad (6)$$

Onde:

PV – O valor presente, ou seja, o valor atual de um fluxo de caixa futuro.

F_t – O fluxo de caixa futuro.

d – A taxa de desconto, número percentual que representa a desvalorização do fluxo a cada ciclo de período t .

t – O momento futuro no qual ocorre o fluxo de caixa, normalmente dado em anos.

A equação (6) representa o valor presente para um único fluxo de caixa no fim de um tempo determinado. Para valores de fluxos que aumentam uniformemente com o passar do tempo, como pode ser considerado o gasto com a energia elétrica, existe a fórmula do Valor Presente Líquido Uniformemente Variado (VPUM), encontrada em (7):

$$VPUM = \sum_{t=1}^n A_0 \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d} \right) = A_0 \cdot \left(\frac{1+\hat{e}}{d-\hat{e}} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] \quad (7)$$

Onde, A_0 representa o fluxo de caixa uniformemente variável; e $\hat{e}$ representa a taxa de escalada no qual o fluxo analisado cresce [4].

B. Custo de Ciclo de Vida

O Custo de Ciclo de Vida (LCC) é a soma de todos os gastos, convertidos para os valores presentes em um determinado instante, que envolvem um equipamento ou processo dentro do período de estudo, normalmente associado à sua vida útil. No caso de um motor elétrico, (8) mostra como pode ser calculado o LCC.

$$LCC = C_I + C_{In} + C_E + C_{O\&M} + C_{Rep} + C_{Env} + C_{res} \quad (8)$$

Onde:

C_I – Custo de aquisição do motor e de eventuais equipamentos de proteção e controle;

C_{In} – Todos os custos iniciais necessários para o funcionamento do motor, como instalação;

C_E – Todo o gasto com energia elétrica do equipamento durante o período de análise;

$C_{O\&M}$ – Custos relacionados aos serviços de operação da máquina e manutenções rotineiras.

C_{Rep} – Custos de reposição de peças;

C_{Env} – Custos relacionados à conservação ambiental, como impostos, taxas ou qualquer gasto que tem como intuito a minimização dos impactos ao meio ambiente;

C_{res} – Custos residuais, ou seja, os gastos com o fim do funcionamento do equipamento, como descarte. [1]

O LCC é o método mais simples para determinar os gastos iniciais e futuros em um projeto de conservação de energia. Pode ser calculado para cada uma das alternativas de projeto e também para o caso base, se houver, e assim compará-los. Se o LCC de uma alternativa de projeto for menor que o do caso base, ela é viável, e a alternativa de menor LCC é a que possui uma maior viabilidade, pois significa que a soma do seu investimento inicial, com todos os gastos previstos durante sua vida útil convertidos ao valor presente, é menor que a do projeto comparado [4].

C. Economia Líquida

Em situações que existem um caso base e alternativas de projetos para serem avaliadas em relação a ele, o cálculo dos LCC's pode não ser suficiente para uma avaliação completa, já que mostra apenas os valores de cada um separadamente.

A Economia Líquida (NS) é um método que calcula, de forma direta, o valor presente líquido da economia prevista na execução de um projeto em comparação a outro. Pode ser, por exemplo, a subtração dos LCC's ou a subtração separada de cada custo contido no LCC de um projeto, pelo custo de mesma natureza que há no projeto a ser comparado. Caso o NS seja positivo, significa que o projeto comparado é viável em relação ao primeiro, e o valor do NS será o valor líquido economizado durante o período de estudo, com a execução do projeto mais viável em relação ao outro.

Para ocasiões como a citada, em que a intenção é avaliar um ou mais projetos alternativos em relação a um caso base, (9) é apropriado para o cálculo do NS, onde todos os valores envolvidos são monetários.

$$NS = LCC_{caso\ base} - LCC_{Projeto\ Alternativo} \quad (9)$$

Descobrimos assim, se a implementação do projeto alternativo é viável e, caso seja, o retorno financeiro do investimento [4].

D. Custo da energia Economizada

Para análises de eficiência energética, muitas vezes é interessante um indicador que relacione investimentos, em valores monetários, com a energia economizada, na unidade referente à energia. Assim, possibilita-se a comparação de projetos que trabalhem com o mesmo tipo de energia, de uma forma que se analise a eficiência entre o investimento e a

economia energética isoladamente, desconsiderando seu valor monetário.

Segundo [1], o Custo da Energia Economizada é um parâmetro econômico-termodinâmico no qual é encontrado pela divisão entre o capital investido na aplicação de um projeto; seja o valor do investimento do em si, ou valor da sua subtração pelo investimento do caso base; e a quantia estimada de energia economizada, ou seu saldo quando se está comparando com um caso base. Deste modo, pode-se estipular o quanto de energia foi economizado para cada unidade de valor monetário investido em um projeto e assim, encontrar a eficiência da proposta, quando o interesse na Análise de Custo de Ciclo de Vida limita-se à avaliação dos fatores economia de energia e investimento necessário, como também, comparar essa eficiência entre as alternativas de projeto.

A equação 8 mostra como é encontrado esse parâmetro:

$$ES = \frac{\Delta I}{\Delta E} \quad (8)$$

Onde:

ΔI – O investimento necessário para a aplicação do projeto.

ΔE – A energia economizada com a aplicação do projeto.

ES – O custo da energia economizada propriamente dita. Indica o valor que precisa ser investido para cada unidade de energia economizada.

Junto ao método NS, o Custo da Energia Economizada satisfaz as necessidades de diferentes perspectivas que se precisa ter em uma análise LCC de projetos que envolvem eficiência energética [1].

IV. METODOLOGIA

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um programa computacional para a análise LCC de projetos de troca de MITRGEs de baixo rendimento para MITRGEs de alto rendimento e executá-lo para um caso real. No fim, será feita uma avaliação dos resultados e a análise será comparada com a do cenário estudado em [7] que tenha as mesmas especificações.

Como a troca será feita por motores de mesma tecnologia, supõe-se que os custos do LCC que serão diferentes, é o investimento e o gasto com a energia elétrica, já que motores de maior rendimento tendem a ser mais caros e consumir menos energia. Com isso, a análise LCC será feita em cima desses gastos.

O intuito do programa será:

- atribuir, dentro de um intervalo de valores possíveis, carregamentos randômicos para os motores originais;
- encontrar os rendimentos IR2 através da potência nominal e dos carregamentos atribuídos;
- com um limite máximo do novo carregamento definido, testar a possibilidade de a troca ser feita por um motor de potência nominal menor, mas com a mesma potência de eixo.
- encontrar os rendimentos dos novos motores a partir dos valores obtidos;
- calcular o LCC, o *Net Savings*, o custo da energia economizada e verificar suas viabilidades;
- gravar os resultados em tabelas para serem analisadas.

Como os carregamentos são atribuídos de forma randômica, deverá ser feito um grande número de repetições da simulação para uma análise estatística dos resultados, e assim, chegar numa avaliação mais condizente com a realidade.

A. Levantamento de dados

Como já explicitado, os motores a quais suas trocas serão analisadas são os utilizados em [8]. São 62 motores de classe IR2 ou indefinido, com potências nominais que variam de 3cv a 7,5cv. A tabela 1 mostra todas as potências destas máquinas e suas respectivas quantidades.

Tabela 1. Motores analisados.

Potência Nominal (cv)	Quantidade	Potência Nominal (cv)	Quantidade
3	20	30	2
4	6	40	2
5	22	50	2
7,5	8		
Total			62

Já os dados necessários para o processo de análise foram extraídos de [7]. Os dados econômicos que são regionais foram considerados os da região Nordeste.

A tabela 2 mostra os valores da taxa de escalada e da tarifa média de energia, ambos para a região Nordeste, como também, a taxa de desconto e a quantidade média de horas de funcionamento anual de um motor. O limite de carregamento para o novo motor escolhido é de 0,8.

Tabela 2. Informações para realização da análise.

Informação	Valor	Informação	Valor
Taxa de escalada(ê)	2,35%	Horas trabalhadas por ano(H)	4368 horas
Tarifa média(T)	0,45608 R\$/kWh	Limite de Carregamento (Limite_carr)	0,8
Taxa de desconto(d)	12%		

Na tabela 3, contém os valores encontrados da faixa de carregamento possível e o tempo de vida útil médio para cada intervalo de potência nominal de motores. Assim, é possível atribuir valores de carregamento randômicos dentro de uma faixa que aproxime a análise da realidade, já que não é possível saber os carregamentos reais dos motores IR2.

Tabela 3. Faixas de Carregamentos e vidas úteis dos motores.

Faixa de Potência (cv)	Faixa de Carregamento (%)	Vida Útil (anos)
$1 \leq P \leq 1,5$	40 – 62	10
$1,5 < P < 10$	40 – 62	12
$10 \leq P < 15$	54 – 64	12
$15 \leq P < 50$	54 – 64	15
$P \geq 50$	54 – 73	15

A tabela 4 mostra valores para o rendimento dos motores em relação à potência nominal, através do carregamento e do índice de rendimento, para as classificações IR2 e IR3, fornecida pela WEG. Foram omitidos os valores para o restante das potências devido ao grande número de dados, porém, serão incluídos nas linhas de programação, já que o intuito do programa é a capacidade de análises para motores de qualquer potência nominal existente no mercado. As informações completas podem ser encontradas na página 57 de [7]. Com esses dados em mãos, torna-se capaz de estimar com precisão o rendimento através do carregamento atribuído ao motor.

Tabela 4. Rendimentos IR2 e IR3 em função dos carregamentos.

Potência(cv)	Carregamento – IR2			Carregamento – IR3		
	50%	75%	100%	50%	75%	100%
3	83,8	84,8	85,1	86	86,5	87,5
4	85,6	86,3	86,5	87,4	88,5	89,5
5	85	87	88	87,5	88,5	89,5
7,5	88,4	89,1	90	89,7	90,3	91

Por fim, na tabela 5 são mostrados os valores de aquisição dos motores IR2 e IR3 também fornecidos pela WEG. Para os motores IR2, como não são mais comercializados, os valores foram atualizados para valores atuais. Pelo mesmo motivo da tabela 4, as informações apresentadas aqui são apenas os necessários para esta análise, mas também são incluídos o restante no programa. Os dados completos estão presentes na página 54 de [7]. Com isso, é possível estipular os valores dos investimentos necessários para o projeto, incluindo a possibilidade da troca por motores de potência nominal imediatamente menor existente no mercado.

Tabela 5. Valores de aquisição dos motores.

Potência (cv)	Preço IR2	Preço IR3
2	R\$1.101,01	R\$1.745,95
3	R\$1.272,80	R\$2.008,28
4	R\$1.621,82	R\$3.489,42
5	R\$1.714,36	R\$2.668,01
6	R\$2.364,93	R\$3.509,76
7,5	R\$2.506,82	R\$3.714,70

V. SIMULADOR EM SCILAB

Baseado na estrutura lógica do programa apresentado em [7], foi desenvolvido neste trabalho, um programa em linguagem SCILAB para a análise CVV. Não houve grandes diferenças na estruturação, já que são linguagens de programação semelhantes, e as que existirem serão destacadas durante a explicação.

O programa foi dividido em três partes que serão explicadas nos próximos tópicos: a principal, que aciona as outras duas; a função “Troca Motor IR2 IR3 Carga” e a função “Net Savings”.

A. Simulador Técnico-econômico das Trocas de Motores

Esta parte do programa é responsável por receber os dados referentes aos motores e as especificações da análise, chamar as demais funções para processá-los, acumular os resultados

de cada processamento e exportá-los em arquivo eletrônico. Sua lógica está estruturada na fig. 1.

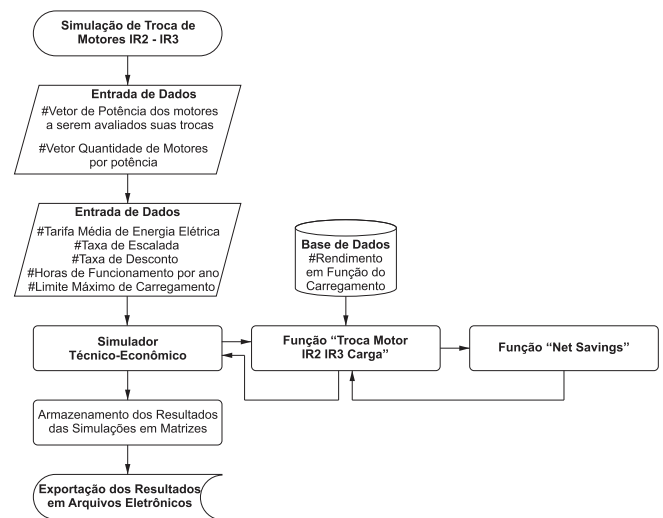


Fig. 1. Fluxograma do simulador “Troca de Motores IR2 - IR3”

A primeira entrada de dados é reservada para os dados referentes aos motores originais. Contém dois vetores, onde são informadas as potências nominais e a quantidade de motores existentes para cada potência, respectivamente.

Já na segunda, são informadas as condições e os dados para o processo de análise em si. São esses: a tarifa média de energia para a região; a taxa de escalada; a taxa de desconto; a quantidade de horas média de funcionamento anual dos motores; o limite máximo de carregamento do novo motor; e o número de repetições da simulação, que é a quantidade de vezes que todas as entradas são analisadas.

A terceira etapa é o processamento de dados propriamente dito. É nesse momento que é chamada a função “Troca Motor IR2 IR3 Carga” e consequentemente, a função “Net Savings” como é mostrado na fig. 1. Os dados dos motores são repassados em grupos de mesma potência nominal por vez, ou seja, uma potência e a quantidade de motores referentes a ela.

A quarta e última etapa é destinada ao armazenamento dos resultados e depois, a exportação em matrizes no formato .csv. Nas matrizes estão contidas uma linha de cabeçalho, e abaixo dela, uma linha para os resultados de cada repetição da simulação. As colunas são separadas por ponto e vírgula no arquivo. A grande diferença desta função para a função do programa inspirado está nessa etapa, pois no segundo, são exportadas planilhas em um arquivo .xls. Essa diferença acontece por não haver uma função capaz disso no SCILAB, porém, os arquivos .csv podem ser facilmente importados em planilhas.

B. Função “Net Savings”

Esta função é chamada pela função “Troca Motor IR2 IR3 Carga”, ou seja, recebe os dados fornecidos por ela e entrega à mesma os resultados processados. É explicada antes por ser requisito para o entendimento da próxima seção. Sua atribuição é declarar os custos de aquisição dos motores IR2 e IR3, calcular o net savings, calcular a energia economizada e depois compará-la com a tarifa média de energia. O fluxograma da fig. 2 mostra suas etapas.

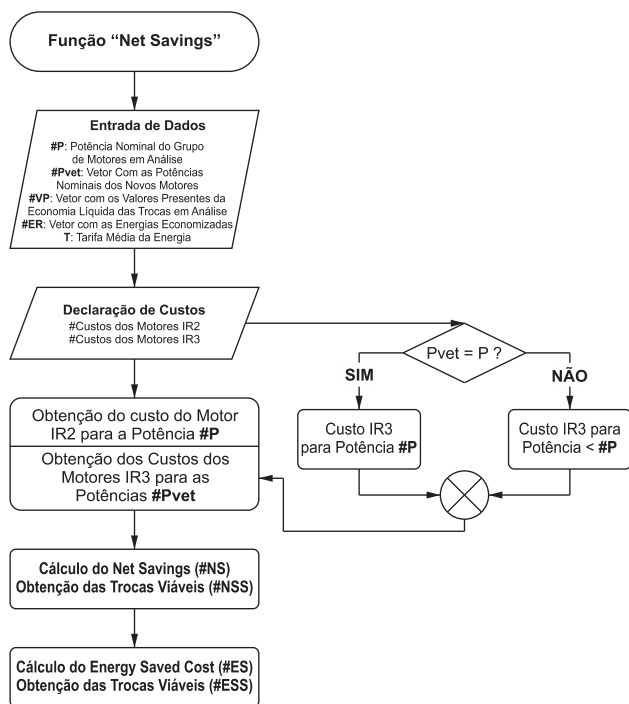


Fig. 2. Fluxograma da função "Net Savings".

A primeira etapa é o recebimento das entradas, as quais são: a potência nominal original do grupo de motores analisado; um vetor com as novas potências, que pode ser a original ou a imediatamente menor, no caso dos motores que foram possíveis diminuir a potência na troca; outro vetor com os valores presentes da economia de energia de cada troca; a energia economizada; e a tarifa média de energia.

Na segunda etapa, é declarado os valores para aquisição dos motores de 1cv à 50cv, tanto para os de baixo rendimento, como os de alto rendimento.

Na terceira etapa, é encontrado o valor de aquisição dos motores de baixo rendimento para a potência original e os valores para os motores de alto rendimento para as novas potências, utilizando as declarações feitas na etapa anterior.

Na quarta e quinta etapa, calcula-se, respectivamente, o Net Savings e a energia economizada. Assim como o número de trocas viáveis em cada método.

C. Função "Troca Motor IR2 IR3 Carga"

Esta função tem como responsabilidade a atribuição randômica dos carregamentos dos motores originais; o teste que define se é possível ou não a troca de potência pela potência menor; o cálculo dos novos carregamentos para as trocas que mantiveram a potência original e o cálculo dos valores presentes das economias de energia em cada troca. Devido à sua extensão, o fluxograma desta função está dividido em duas imagens, como mostram as figs. 3 e 4.

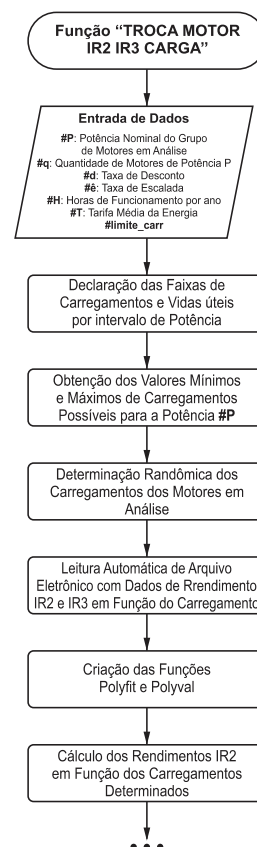


Fig. 3. Fluxograma da função "Troca Motor IR2 - IR3 Carga" (Parte 1).

Primeiramente, como mostra a fig. 3, são recebidas as entradas: potência nominal do grupo de motores que serão analisados; quantidade de motores; taxa de desconto; taxa de escalada; horas de trabalho média por ano dos motores; tarifa média de energia; e o limite máximo dos carregamentos dos novos motores.

De maneira subsequente, é feita a declaração das faixas de carregamento possíveis e das vidas úteis médias, separados por intervalos de potência, e depois é encontrado em qual a potência do grupo de motores originais se encaixa. Com isso, é feita a atribuição randômica dos carregamentos.

Por conseguinte, ocorre a leitura dos dados de rendimento para os carregamentos em motores IR2 e IR3.

Foi adicionado uma função nesse programa que cria os comandos "polyfit" e "polyval". Isso foi necessário porque no Scilab não há comandos similares a estes. Essa é a diferença mais relevante que há entre os dois programas.

Criadas as funções e recebidos os dados de rendimento, são geradas as curvas aproximadas, para a potência analisada, do rendimento IR2 em relação ao carregamento. Isso é necessário devido ao fato de se ter o valor do rendimento apenas para 3 carregamentos (0,5; 0,75 e 1), então, cria-se uma curva para cada intervalo (0 à 0,5; 0,5 à 0,75 e 0,75 à 1).

A partir dos carregamentos atribuídos, são encontrados os rendimentos de cada motor nas curvas (rendimentoIR2 x carregamento), encerrando os processos listados no fluxograma da fig. 3.

Na fig. 4, é encontrado a segunda parte do fluxograma, onde iniciam-se os processos de troca. Os quais começam com o cálculo das potências de eixo, a partir dos rendimentos encontrados na etapa anterior.

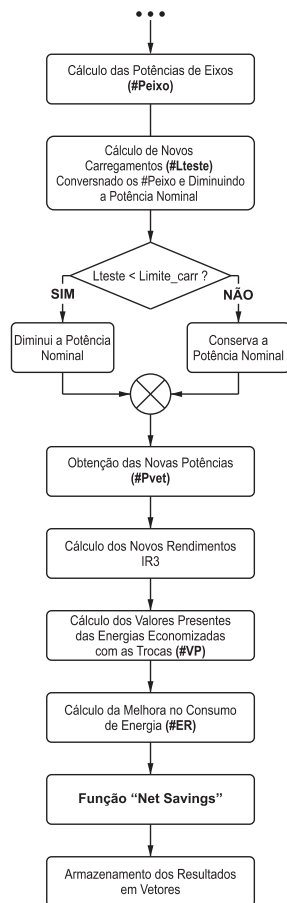


Fig. 4. Fluxograma da função "Troca Motor IR2 - IR3 Carga" (Parte 2).

Em seguida, é executado o teste que verifica se é possível a troca por motor de menor potência. O teste é realizado calculando-se novos carregamentos utilizando a potência nominal imediatamente menor que a original e as potências de eixo encontradas: caso o novo carregamento chegue ou ultrapasse o limite definido na variável "limite_carr", não é possível realizar a troca, caso contrário, a diminuição da potência para o novo motor será considerada.

Da mesma forma que foram geradas as curvas de rendimento IR2 e encontrado os rendimentos dos motores originais, são geradas as curvas de rendimento IR3 em relação ao carregamento e calculados os rendimentos dos novos motores.

Com os resultados, são encontrados o valor presente da energia economizada de cada troca durante sua vida útil e a melhora no consumo.

Por fim, chama a função "Net Savings" para a realização de suas atribuições e armazena os resultados em vetores.

VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente trabalho, foi desenvolvido um programa em SCILAB para a análise CVV de projeto de troca de MITRGEs de rendimento IR2 para MITRGEs de rendimento IR3, analisando também a possibilidade dessa troca ser feita por motores de potência menor. Também foi feita a execução deste programa para um dos cenários analisados em [7]. O cenário escolhido foi o que considera o parque fabril localizado na região Nordeste, com o limite de carregamento

do novo de 0,8. O número de simulações escolhido foi de 1000, o mesmo de [7].

Neste capítulo, será feita uma análise dos resultados obtidos, como também, a comparação destes com os alcançados no mesmo cenário em [7]. Para uma comparação mais clara, os intervalos apresentados nos gráficos foram os mesmos.

A primeira análise a ser feita é em relação às simulações com o número de *Net Savings* viáveis. Cada simulação obteve um número de trocas, entre os 62 motores que foram viáveis, ou seja, com os *Net Savings* positivos. A fig. 5 apresenta o gráfico de Pareto com o número de trocas de NS viáveis, em cada simulação, em relação à distribuição de frequência.

É possível perceber que, em apenas 7,6% das simulações, as trocas foram viáveis para todos os 62 motores, porém, foram viáveis o total de 60, 61 e 59 trocas, em 26,9%, 25,3% e 23,3% das simulações, respectivamente. A frequência acumulada para 58 a 62 trocas é de 95,1%, o que significa que em pouco mais de 95% das simulações, foram viáveis as trocas de pelo menos 58 motores.

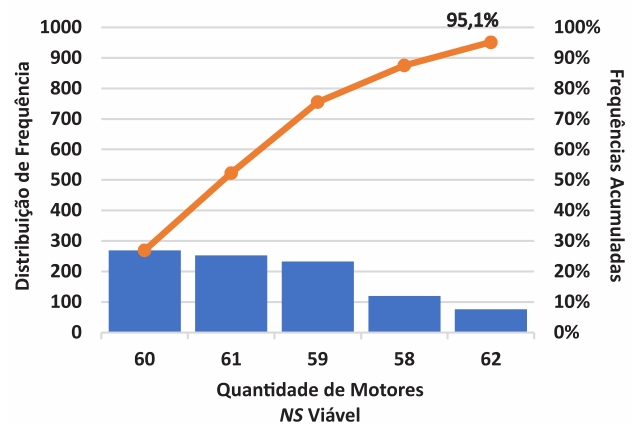


Fig. 5. Número de NS viáveis em relação à distribuição de frequência (estudo atual).

O gráfico da fig. 6 foi retirado de [7] e também representa o total de trocas com o NS viável, para as mesmas condições. Percebe-se que a ordem decrescente das maiores frequências dos resultados é a mesma, como também, que as frequências têm valores bem próximos, e ainda, que a frequência acumulada para o mesmo intervalo de total de trocas é quase o mesmo, com uma diferença de apenas 0,3%.

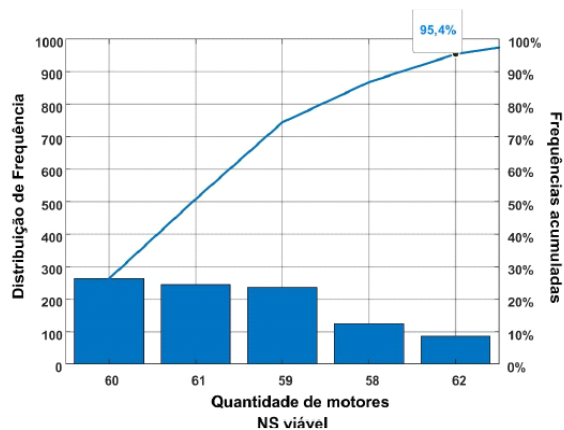


Fig. 6. Número de NS viáveis em relação à distribuição de frequência (estudo comparado).

A próxima análise é sobre as trocas com o ES viável. A fig. 7 mostra o gráfico da distribuição de frequência das simulações com a quantidade igual de trocas viáveis, no intervalo de 43 à 52 total de trocas.

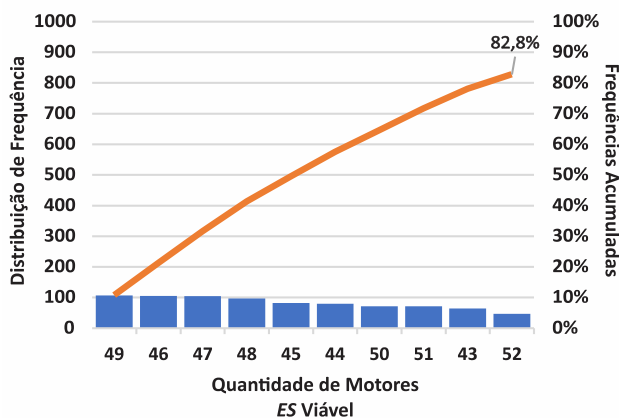


Fig. 7. Número de ES viáveis em relação à distribuição de frequência (estudo atual).

Percebe-se que, de todas as frequências, apenas as 4 maiores se aproximam de 10%, evidenciando um menor acúmulo. Em nenhuma das simulações ocorreram a troca de todos os 62 motores e, para os valores acima de 52, as frequências não passaram de 3%. Segundo o gráfico, a frequência acumulada para as simulações que obtiveram o total de trocas com a energia economizada, dentro do intervalo proposto, foi de 82,8%.

Na fig. 8, contém o gráfico com os resultados do estudo em comparação. Para essa análise, foi percebido também, uma grande proximidade, mas menor que a comparação anterior. Segundo os dois gráficos, a diferença das frequências acumuladas foi de 1,3%.

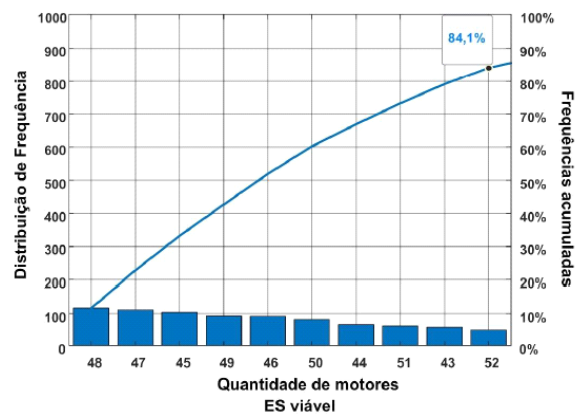


Fig. 8. Número de ES viáveis em relação à distribuição de frequência (estudo comparado).

Em seguida, será discutido as simulações que analisaram o número de motores que puderam ter a potência reduzida na troca, ou seja, os motores que, conservando a potência de eixo e diminuindo a potência nominal, os carregamentos não passaram de 0,8. As informações de frequência desses resultados estão no gráfico da fig. 9.

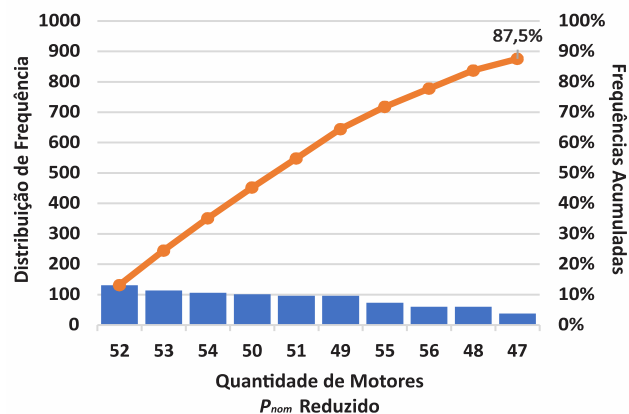


Fig. 9. Motores substituídos com redução de potência nominal (estudo atual)

O gráfico apresenta os números de simulações que obtiveram a mesma quantidade de trocas, levando em conta a redução da potência, e a frequência acumulada no intervalo de resultados com 47 a 56 trocas.

Percebe-se que, nesse caso, também há uma variação menor nas frequências mais altas do que a análise NS, porém, um pouco maior que a análise ES. Entre as 10 maiores frequências, 6 se aproximam bastante de 10% ou ultrapassam esse valor e, assim como na análise ES, as frequências para o total de trocas acima dos mostrados não passou de 3%. A frequência acumulada para o total de trocas entre 47 e 56 foi de 87,5%.

A fig. 10 representa o gráfico com os resultados, de mesma natureza, da referência [7]. É possível perceber, mais uma vez, uma grande similaridade com os resultados deste trabalho. A diferença das frequências acumuladas para a mesma faixa de total de trocas viáveis foi de 0,5%.

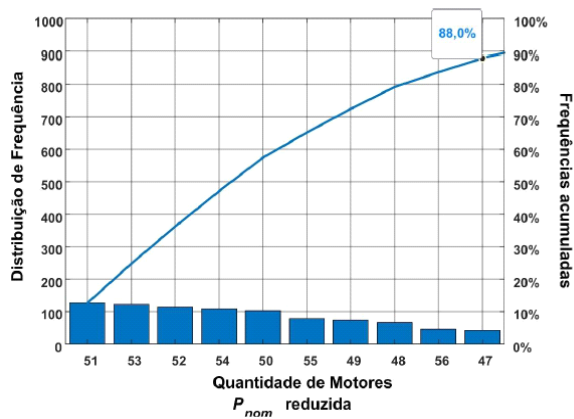


Fig. 10. Motores substituídos com redução de potência nominal (*estudo comparado*).

Para concluir, serão analisados os resultados referentes aos valores das economias líquidas das trocas viáveis. A fig. 12 mostra, respectivamente, os gráficos da distribuição de frequência e da densidade de probabilidade, a qual inclui a discreta e contínua aproximada. Representa os valores atuais, em reais, dos custos economizados com as trocas que possuem NS viáveis nas 1000 simulações, durante a vida útil dos motores.

Na distribuição de frequência, é possível perceber que a concentração das maiores frequências está para as economias líquidas entre R\$ 76.000,00 e R\$ 120.000,00, ocorrendo em mais de 80% das vezes, com o pico no intervalo de R\$ 88.000,00 à R\$ 92.000,00, ocorrendo em mais de 10% das simulações.

Já na densidade de probabilidade, a mesma concentra-se na faixa entre R\$76.000,00 e R\$116.000,00, indicando que a maior probabilidade da economia líquida com a execução do projeto, em valor presente, seja dentro dessa faixa, com o pico próximo à R\$ 96.000,00.

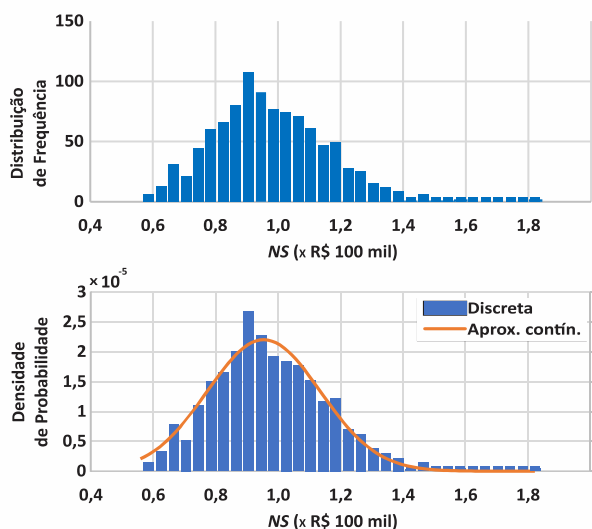


Fig. 11. Economia líquida com as trocas viáveis (*estudo atual*).

Na fig. 12, encontra-se os gráficos do estudo ao qual está sendo comparado. É possível perceber que é um pouco menos achatado, com as maiores distribuições de frequências condensados entre R\$ 80.000,00 e R\$ 115.000,00 e o pico acontece entre R\$ 95.000,00 e R\$ 100.000,00, ocorrendo em mais de 12% das simulações. Da mesma forma, o pico da

densidade de probabilidade acontece próximo à R\$ 100.000,00 com a probabilidade levemente maior do que o pico do mesmo gráfico obtido no presente trabalho. Ambas as informações indicam que os resultados alcançados em [7] é um pouco mais otimista, porém, com uma diferença irrisória.

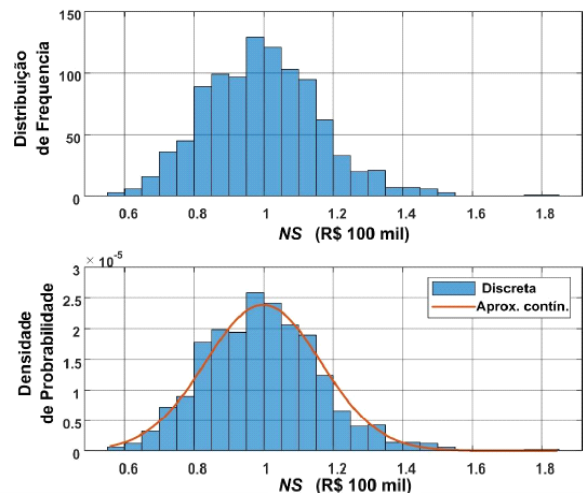


Fig. 12. Economia líquida com as trocas viáveis (*estudo comparado*).

VII. CONCLUSÕES

Feitas as simulações, as análises dos resultados e as comparações dos gráficos, chega-se ao momento de avaliar se os objetivos desse trabalho foram realizados.

Primeiramente, analisou-se a quantidade de trocas com NS viáveis nas simulações. A frequência dos resultados concentrados em poucos números diferentes de trocas viáveis e a frequência acumulada de 95,1% para trocas de 58 motores ou mais, apontam uma ótima viabilidade para a troca do maior número possível de motores.

Depois, foi analisado a quantidade de trocas com ES viáveis. Os resultados da análise do custo da energia economizada apresentam uma distribuição de frequência mais dispersa, com os maiores valores um pouco maior que 10%, e valores baixos para trocas acima de 52 motores, indicando ser um critério mais restritivo que o NS. Mesmo assim, a frequência acumulada de 88,2% para as simulações com 43 à 52 trocas, revela-se um bom resultado para as trocas a partir desse critério.

Também foi feita a verificação dos resultados das trocas que se mostraram promissoras, por além de motores com classe de rendimento IR3, pela potência nominal imediatamente menor encontrado no mercado. Assim como na análise ES, os resultados tiveram uma distribuição de frequência mais fragmentada que no NS, mas, mais concentrada que o primeiro e com as maiores frequências num intervalo de quantidade de trocas com valores maiores. Para trocas entre 47 e 56 motores foi acumulada uma frequência de 87,5%, o que indica também um bom resultado.

Foi apresentado, por último, os resultados dos valores presentes das economias líquidas das trocas com NS viáveis. Essa análise traz uma melhor noção do impacto real da execução desse projeto. As trocas se mostraram bastante viáveis, já que os retornos financeiros mais frequentes nas

simulações ultrapassaram R\$ 75.000,00 e o valor de maior probabilidade está em torno de R\$ 97.000,00.

Com a análise dos gráficos de [7], mostrou-se uma grande proximidade com os resultados deste trabalho na comparação. Pequenas variações foram encontradas nos resultados, o que, por ser uma análise estatística, podem ser consideradas irrelevantes para o número de dados apresentados. Isso demonstra que o programa criado cumpre seus objetivos.

A partir dos bons resultados atingidos, principalmente na análise da economia líquida, pode-se considerar que a análise do custo de ciclo de vida se mostra um método eficiente para avaliação de projetos de trocas de motores, como também evidencia a necessidade dessas trocas quando ainda se tem motores de baixos rendimentos ou desconhecidos. A comparação dos resultados dos dois trabalhos também reforça essa eficiência, além de comprovar a funcionalidade do programa. Com isso, o trabalho realizado satisfaz todos os objetivos previamente traçados.

A. Registro Junto ao INPI

Este trabalho propõe como objetivo futuro o registro intelectual do programa desenvolvido junto ao INPI, válido por 50 anos, nos 177 países que assinaram a Convenção de Berna (1886). Para isso, é necessário:

- Realizar a criptografia do arquivo com o código-fonte através de um algoritmo apropriado, transformando-o em um resumo digital *hash*.
- Cadastrar-se no e-INPI e então emitir e pagar a guia de recolhimento da união (GRU), assim como baixar a Declaração de Veracidade (DV) e assiná-la digitalmente
- Entrar no sistema e-Software, preencher o formulário e inserir o resumo *hash* e a DV, iniciando o pedido de registro.

O prazo para o registro ser publicado é de 10 dias e pode ser acompanhado o andamento consultando a Revista de Propriedade Industrial (RPI), publicada toda terça-feira [6].

REFERÊNCIAS

- [1] ANDRADE, Cássio Tersandro de Castro et al. Uma abordagem determinística com análise de incerteza para a viabilidade de programas de eficiência energética: estudo de caso de motores elétricos. 2017.
- [2] EPE, Empresa de Pesquisa Energéticas. Balanço Energético Nacional 2020-Ano base 2019. **Rio de Janeiro**, 2020.
- [3] FERREIRA, Fernando JTE; DE ALMEIDA, Aníbal T. Reducing energy costs in electric-motor-driven systems: savings through output power reduction and energy regeneration. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 24, n. 1, p. 84-97, 2017.
- [4] FULLER, Sieglinde et al. Life-cycle costing manual for the federal energy management program, NIST Handbook 135. 1996.
- [5] GARCIA, Agenor Gomes Pinto. Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria. **COPPE UFRJ, M. Sc., Planejamento Energético-Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2003.
- [6] INSTITUTO NACIONAL DE PROPRIEDADE INDUSTRIAL. **Guia Básico de Programa de Computador**, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/inpi/pt-br/cadastro-no-e-inpi>>. Acesso em: 24 de nov. de 2021.
- [7] JÚNIOR, Adriano Araújo Gonçalves. Avaliação técnico-econômica da troca de motores em parques fabris de médio porte: simulação de cenários em regiões distintas do Brasil. **Universidade Federal Rural do Semi-Árido**, 2021.
- [8] LIMA, Kelly CD et al. Avaliação Técnico-Econômica da Troca de Motores Industriais pela Análise do Carregamento e Cálculo da Economia Líquida em uma Indústria Salineira. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020.
- [9] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Constituição (2017). Portaria Interministerial Nº 1 nº 1, de 29 de junho de 2017. 1. . 1. ed. Brasília, DF, 29 jun. 2017. Seção 1. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19266787/do1-2017-08-30-portaria-interministerial-n-1-de-29-de-junho-de-2017-19266690. Acesso em: 20 outubro 2021.