



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ADRIANO ARAÚJO GONÇALVES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DA TROCA DE MOTORES EM  
PARQUES FABRIS DE MÉDIO PORTE: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS  
EM REGIÕES DISTINTAS DO BRASIL**

MOSSORÓ

2021

ADRIANO ARAÚJO GONÇALVES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DA TROCA DE MOTORES EM  
PARQUES FABRIS DE MÉDIO PORTE: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS  
EM REGIÕES DISTINTAS DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Orientador: Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar

MOSSORÓ

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

G95a Gonçalves Júnior, Adriano Araújo .

Avaliação Técnico-econômica da Troca de Motores em Parques Fabris de Médio Porte: Simulação de Cenários em Regiões Distintas do Brasil / Adriano Araújo Gonçalves Júnior. - 2021.

125 f. : il.

Orientador: Victor de Paula Brandão Aguiar. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2021.

1. Economia Líquida. 2. Rentabilidade. 3. Motor de Indução. 4. Taxa de Escalada. 5. Custo de Ciclo de Vida (CCV). I. Brandão Aguiar, Victor de Paula, orient. II. Título.

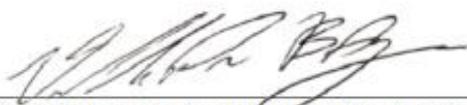
O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

# **AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DA TROCA DE MOTORES EM PARQUES FABRIS DE MÉDIO PORTE: SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS EM REGIÕES DISTINTAS DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

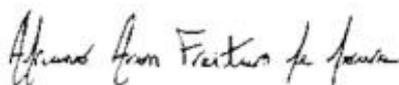
Defendida em: 29/07/2021

## **BANCA EXAMINADORA**



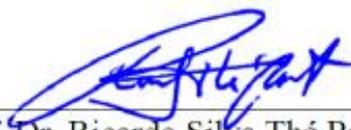
---

Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar – UFERSA



---

Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura – UFERSA



---

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes – UFC

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela oportunidade e força nos momentos mais difíceis durante essa caminhada.

Aos meus pais, Adriano Araújo e Andréa Carla que, com muito amor e dedicação, não mediram esforços para que eu chegasse até esta importante etapa da minha vida.

A minha companheira, Laryssa Vasconcelos, que dividiu comigo cada palavra escrita neste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar, que sempre se mostrou compreensivo e solícito durante toda esta caminhada, contribuindo de forma significativa para elaboração deste trabalho e transmitindo importantes conhecimentos profissionais e da vida.

Aos meus familiares, amigos e demais colegas que sempre me incentivaram.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)

## RESUMO

Na busca por um consumo de energia mais eficiente, ações voltadas para troca de motores de indução por motores mais eficientes em parques industriais com grande diversificação de motores, tem-se consolidado como um dos principais investimentos voltados à eficiência energética. Sob este prisma, o presente estudo tem o objetivo de determinar, com confiabilidade, informações relativas à viabilidade e rentabilidade da troca de motores elétricos por motores mais eficientes em parques industriais semelhantes de médio porte, situados em regiões distintas do Brasil, e assim, determinar em termos de rentabilidade econômica a melhor região do Brasil, na classe de consumo industrial, para realização da troca de motores de indução. Para tanto, dados de consumo e receita de energia elétrica (das concessionárias) foram coletados e estratificados. Com base nos mesmos, foram calculadas as taxas de escalada por região do Brasil. Por conseguinte, foi construído um simulador específico para automatizar a troca de motores. O mesmo leva em consideração análise do custo do ciclo de vida (CCV) para determinar a viabilidade técnico-econômica da troca. De maneira subsequente, fez-se a aplicação do simulador em um estudo de caso foi realizado com intuito de mostrar a validação dos valores encontrados e a eficácia do método aplicado. O estudo partiu da suposição de uma indústria de bens de consumo, de médio porte com duas filiais em regiões diferentes: Nordeste, Sudeste e Centro-oeste do Brasil. Os resultados se mostraram satisfatórios, uma vez que todos os objetivos propostos no trabalho foram atingidos. Dados referentes à viabilidade técnico-econômica mostraram que melhor região para realização da troca de motores para a classe de consumo industrial é a região centro-oeste do Brasil. Além disso, as variações nos valores de carregamento das opções de troca se mostraram decisivas na determinação da viabilidade dos motores substituídos.

**Palavras-chave:** Economia Líquida. Rentabilidade. Motor de indução. Taxa de Escalada. Custo de Ciclo de Vida (CCV).

## ABSTRACT

In the search for more efficient energy consumption, actions aimed at replacement of induction motors for more efficient motors in industrial parks with a great diversification of motors have been consolidated as one of the main investments aimed at energy efficiency. From this perspective, this study aims to reliably determine information about the cost-effectiveness of replacement electric motors for more efficient motors in similar medium-sized industrial parks located in different regions of Brazil, and thus, determine in terms of economic profitability the best region in Brazil in the industrial consumption class to carry out the replacement of induction motors. For this purpose, electricity consumption and revenue data were collected and stratified. Based on them, the electricity escalation rate by region of Brazil were calculated. Therefore, a specific simulator was built to automate the replacement of electric motors. It takes into account life cycle cost analysis (LCC) to determine the technical-economic cost-effectiveness of the replacement. Subsequently, the simulator was applied in a case study that was carried out in order to show the validation of the values found and the effectiveness of the applied method. The study started from the assumption of a medium-sized consumer goods industry with two branches in different regions: Northeast, Southeast and Midwest of Brazil. The results proved to be satisfactory, since all the objectives proposed in the work were achieved. Data referring to technical-economic cost-effectiveness showed that the best region to carry out the replacement of electric motors for the industrial consumption class is the Midwest region of Brazil. Furthermore, variations in the loading values of the replacement options proved to be decisive in determining the viability of the replaced motors.

**Keywords:** Net Savings. Cost-Effectiveness. Induction Motor. Electricity Escalation Rate.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consumo e receita de energia elétrica no Brasil entre os anos de 1996 e 2020 .....	29
Tabela 2. IPCA acumulado entre os anos de 1996 e 2020 .....	30
Tabela 3. Tarifa média de fornecimento para classe de consumo industrial por região do Brasil entre os anos de 1996 e 2020.....	31
Tabela 4. Taxa de crescimento da Tarifa média de fornecimento para classe de consumo industrial para região sudeste do Brasil entre os anos 1996 e 2020. ....	32
Tabela 5. Taxa de crescimento acumulado da inflação entre os anos 1996 e 2020. ....	33
Tabela 6. Taxa de Escalada para Classe de Consumo Industrial por região do Brasil.....	37
Tabela 7. Fator $(I+\hat{e})/(I+d)$ para Classe de Consumo industrial por região do Brasil.....	37
Tabela 8. Atualização monetária para classe de consumo industrial por região do Brasil para o horizonte de 15 anos. ....	39
Tabela 9. Percentual de perda da rentabilidade em investimentos por região em relação a região Sudeste Brasil. ....	40
Tabela 10. Tempo médio de vida útil de motores elétricos.....	42
Tabela 11. Carregamentos médios para motores de indução trifásicos no Brasil. ....	50
Tabela 12. Faixa de Carregamentos Médios por Potência .....	51
Tabela 13. Opções de Troca de Motor IR2 - 50cv com base no Custo de Energia para as regiões Sudeste e Nordeste do Brasil. ....	51
Tabela 14. Preços em Dólar (\$) para MIT de índices IR2 4 polos em março de 2016. ....	53
Tabela 15. Preços referentes a abril de 2021 - MIT IR2 IV Polos. ....	54
Tabela 16. Preços MIT IR3 - IV Polos.....	54
Tabela 17. Quantitativo de MIT – Indústria. ....	55
Tabela 18. Rendimentos de Motores IR2 e IR3 com em função do Carregamento. ....	57
Tabela 19. Taxa de Escalada e preço do kWh médio por região para classe de consumo industrial. ....	58
Tabela 20. Viabilidade com base nos valores mínimos e máximos da quantidade de motores substituídos com NS viável e na frequência total acumulada. ....	72
Tabela 21. Viabilidade do ES com base nos valores mínimos e máximos da quantidade de motores substituídos com ES viável e na frequência total acumulada. ....	74

Tabela 22. Motores substitutos que possuem potência reduzida em relação a potência original. .....	76
Tabela 23. Economia Líquida média, mínima e máxima por região do Brasil e respectivo limite do novo carregamento no processo de troca. ....	77
Tabela 24. Comparativo por região do maior valor de economia líquida média, mínima e máxima por carregamento. ....	78
Tabela 25. Cálculo do coeficiente assimetria de <i>Pearson</i> . ....	82
Tabela 26. Cálculo da curtose para os valores simulados. ....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma para obtenção de taxa de escalada de energia elétrica. ....	28
Figura 2. Variação da tarifa média acumulada de energia elétrica para classe de consumo industrial na região centro-oeste do Brasil em relação a inflação acumulada entre os anos de 1996 e 2020. ....	34
Figura 3. Variação da tarifa média de energia elétrica para classe de consumo industrial na região Sul do Brasil em relação a inflação entre os anos de 1996 e 2020. ....	34
Figura 4. Variação da tarifa média de energia elétrica para classe de consumo industrial na região Sudeste do Brasil em relação a inflação entre os anos de 1996 e 2020. ....	35
Figura 5. Variação da tarifa média de energia elétrica para classe de consumo industrial na região Norte do Brasil em relação a inflação entre os anos de 1996 e 2020. ....	35
Figura 6. Variação da tarifa média acumulada de energia elétrica para classe de consumo industrial na região Nordeste do Brasil em relação a inflação acumulada entre os anos de 1996 e 2020. ....	36
Figura 7. Valores Presentes, ano a ano, por região do Brasil e classe de consumo industrial para um horizonte de 25 anos. ....	38
Figura 8. Valor Presente Líquido por região do Brasil e classe de consumo industrial para o valor de 15 anos. ....	39
Figura 9. Variação do Valor Presente Líquido com base no fator $(1+\hat{e}) / (1+d)$ para um ciclo de 15 anos. ....	40
Figura 10. Carregamento médio por hora/ano de funcionamento para os polos da Europa, EUA e Brasil. ....	50
Figura 11. Fluxograma do Simulador Troca de Motores IR2 - IR3. ....	60
Figura 12. Fluxograma da Função "Net Savings" ....	61
Figura 13. Fluxograma inicial da função "Troca Motor IR2 IR3 Carga" ....	63
Figura 14. Fluxograma 2 função "Troca Motor IR2 IR3 Carga". ....	64
Figura 15. fluxograma do processo automático da troca de motores da função. ....	65
Figura 16. Cálculo dos parâmetros função "TROCA MOTOR IR2 IR3 CARGA" ....	67
Figura 17. NS viável em relação à distribuição de frequência para o valor do limite do carregamento na troca de 0,75 para região Centro-Oeste. ....	71
Figura 18. NS viável em relação à distribuição de frequência para o valor do limite do carregamento na troca de 0,75 para região Nordeste. ....	71

Figura 19. ES viável em relação à distribuição de frequência para o valor do limite do carregamento na troca de 0,75 para região Centro-Oeste.....	73
Figura 20. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para um limite do novo carregamento igual a 0,75 na região Centro-Oeste do Brasil.....	75
Figura 21. <i>Net Savings</i> em função da distribuição de frequência para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Nordeste. ....	80
Figura 22. <i>Net Savings</i> em função da densidade de probabilidade para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Nordeste. ....	80
Figura 23. <i>Net Savings</i> em função da distribuição de frequência para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Sudeste. ....	80
Figura 24. <i>Net Savings</i> em função da densidade de probabilidade para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Sudeste. ....	81
Figura 25. <i>Net Savings</i> em função da distribuição de frequência para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Centro-Oeste.....	81
Figura 26. <i>Net Savings</i> em função da densidade de probabilidade para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Centro-Oeste.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
ES – *Energy Saved Cost*  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IEC – *International Electrotechnical Commission*  
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia  
IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo  
IR2 – Índice de Rendimento 2  
IR3 – Índice de Rendimento 3  
MEPS – *Minimum Energy Performance Standards*  
MIT – Motor de Indução Trifásico  
MITRGE – Motores de indução com rotor gaiola de esquilo  
MME – Ministério de Minas e Energia  
NS – *Net Savings*  
PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem  
PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
VP – Valor Presente  
VPL – Valor Presente Líquido

## LISTA DE SIMBOLOS

$C_E$  – Custos de Energia

$C_I$  – Custo Iniciais

$C_{O\&M}$  – Custos de Operação e Manutenção

$C_{Rep}$  – Custos com reposição de peças e equipamentos

$C_{Res}$  – Custos Residuais

$C_t$  – Custo do fluxo de caixa no tempo  $t$

$d$  – Taxa de Desconto

$\hat{e}$  - Taxa de Escalada da Tarifa de Energia

$E_{ar}$  – Custo da energia elétrica consumida pela opção de melhor rendimento

$E_{br}$  – Custo da energia elétrica consumida pela opção de pior rendimento

$ES$  – *Energy Saved Cost*

$H$  – Horas de operação por ano

$I_{ar}$  – Investimento financeiro na opção de melhor rendimento

$I_{br}$  – Investimento financeiro na opção de pior rendimento

$L$  – Carregamento

$m'$  – Tempo sobre o qual o investimento pode ser financiado  
motores

$n^*$ - Quantidade de anos da análise da série histórica das tarifas de energia elétrica e da inflação

$NS$  – *Net Savings*

$P_n$  – Potência Nominal

$T$  – Tarifa Média de Energia

$t$  – Tempo em anos

$VP$  – Valor Presente

$VPL$  – Valor Presente Líquido

$\Delta E$  – Diferença financeira no custo da energia elétrica conservada na troca de

$\Delta I$  – Diferença financeira no investimento na troca de motores

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO NA INDÚSTRIA .....	18
1.2 PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 1, DE 29 DE JUNHO DE 2017 .....	19
1.3 PROJETO PRIORITÁRIO DE INCENTIVO A SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS .....	20
1.4 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	21
1.5 ESTADO DA ARTE .....	21
1.6 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS .....	23
<b>2 ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA .....</b>	<b>25</b>
2.1 VALOR PRESENTE .....	25
2.3 TAXA DE DESCONTO NA ANÁLISE DO CCV .....	26
2.4 TAXA DE ESCALADA DA ENERGIA ELÉTRICA .....	27
2.5 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ESCALADA DA ENERGIA ELÉTRICA .....	28
<b>2.5.1 Coleta de Dados de Consumo e Receita de Energia Elétrica nas Distribuidoras do Brasil .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.2 Coleta de Dados de Índice de Inflação IPCA.....</b>	<b>29</b>
<b>2.5.3 Estratificação dos dados de Consumo e Receita de Energia Elétrica .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.4 Obtenção da Taxa de Escalada da Energia Elétrica .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.5 Determinação da melhor região do Brasil na classe de consumo industrial para realização da troca de motores.....</b>	<b>37</b>
2.6 ANÁLISE CCV NA TROCA POR MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS MAIS EFICIENTES .....	41
<b>2.6.1 Rendimento e Carregamento do Motor de Indução Trifásico (MIT) .....</b>	<b>41</b>
<b>2.6.2 Características Básicas da Análise CCV do Motor de Indução Trifásico .....</b>	<b>42</b>
<b>2.6.3 Método da Economia Líquida Aplicada ao MIT .....</b>	<b>44</b>
<b>2.6.4 Cálculo da Energia Economizada .....</b>	<b>47</b>
<b>3 TROCA DE MOTORES LEVANDO EM CONTA O CARREGAMENTO .....</b>	<b>48</b>
3.1 EVOLUÇÃO DOS ÍNDICES DE RENDIMENTO NO BRASIL .....	48
3.2 TROCA DE MOTORES SEM A MUDANÇA DE CARREGAMENTO .....	49
<b>3.2.1 Determinação dos Carregamentos da população de MIT com Base na Faixa de Potência .....</b>	<b>50</b>
3.3 TROCA DE MOTORES COM MUDANÇA DE CARREGAMENTO .....	51

3.4 VALORES FINANCEIROS DO MOTOR IR2 E IR3 .....	52
3.5 ESTUDO DE CASO: EMPRESA INDUSTRIAL COM DOIS PARQUES FABRIS EM REGIÕES DISTINTAS DO BRASIL .....	55
<b>3.5.1 Troca de Motores em Indústria Salineira de Médio Porte .....</b>	<b>55</b>
<b>3.5.2 Estudo de Caso proposto: Troca de Motores em Indústria de médio porte com unidades Fabris em regiões distintas do Brasil .....</b>	<b>56</b>
3.5.2.1 Determinação dos Carregamentos da população de MIT .....	57
3.5.2.2 Determinação dos Rendimentos da população de MIT .....	57
3.5.2.3 Dados para Análise Econômica .....	57
3.5.2.4 Programação computacional para simular a troca do MIT .....	58
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	58
<b>4 SIMULAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA TROCA DE MOTORES .....</b>	<b>58</b>
4.1 ESPECIFICAÇÕES DO SIMULADOR .....	59
4.2 SIMULADOR TÉCNICO E ECONÔMICO DAS TROCAS DE MOTORES .....	59
4.3 FUNÇÃO “ <i>NET SAVINGS</i> ” .....	61
4.4 FUNÇÃO “TROCA MOTOR IR2 IR3 CARGA” .....	63
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>70</b>
5.1 QUANTIDADE DE TROCAS DE MOTORES COM <i>NET SAVINGS</i> VIÁVEL .....	70
5.2 QUANTIDADE DE TROCAS DE MOTORES COM <i>ENERGY SAVED COST</i> VIÁVEL.....	73
5.3 QUANTIDADE DE MOTORES SUBSTITUÍDOS COM POTÊNCIA NOMINAL REDUZIDA .....	75
5.4 ECONOMIA LÍQUIDA TOTAL OBTIDA APÓS AS TROCAS .....	77
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>85</b>
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	86
6.2 PUBLICAÇÕES .....	87
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE A - RECEITA E CONSUMO DE ENERGIA PARA CLASSE DE CONSUMO INDUSTRIAL DO BRASIL .....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE B – CÓDIGOS EM PSEUDOCÓDICO PORTUGOL DO SIMULADOR TÉCNICO E ECONÔMICO .....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE C - NS VIÁVEL EM RELAÇÃO A DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA PARA OS VALORES VARIÁVEIS DE LIMITE DO NOVO CARREGAMENTO E POR REGIÃO. ....</b>	<b>104</b>

<b>APÊNDICE D - ES VIÁVEL EM RELAÇÃO A DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA PARA OS VALORES VARIÁVEIS DE LIMITE DO NOVO CARREGAMENTO E POR REGIÃO. ....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE E - QUANTIDADE DE MOTORES SUBSTITUÍDOS COM POTÊNCIA NOMINAL REDUZIDA .....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE F - NET SAVINGS EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA PARA VALORES VARIÁVEIS DO LIMITE DE NOVO CARREGAMENTO POR REGIÃO. ....</b>	<b>121</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do padrão de consumo de energia elétrica no Brasil, o país tem buscado de maneira concreta a diversificação de sua matriz elétrica e a conscientização para um consumo mais eficiente por parte da população.

Nesse sentido, o governo brasileiro vem instituindo ao longo dos anos programas de incentivo a eficiência energética, dentre os quais, se destacam o programa brasileiro de etiquetagem (PBE) e a regulamentação dos índices mínimos de eficiência para equipamentos, resultado da Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, também conhecida como “Lei da eficiência energética”. Sob este prisma, ações voltadas para troca de motores de indução por motores mais eficientes em parques industriais com grande diversificação de motores, tem-se consolidado como um dos principais investimentos voltados à eficiência energética. Aliado a isso, o projeto prioritário de incentivo a substituição de motores elétricos através da chamada Nº 002/2015, da ANEEL, fomentou esta prática de forma definitiva. Entretanto com algumas questões técnicas importantes a se salientar: no âmbito do diagnóstico energético, não foi considerado o carregamento dos motores em operação.

Investimentos em eficiência energética como a troca de motores, carecem de dados técnicos e econômicos precisos que comprovem a viabilidade e rentabilidade da troca apresentando ao empreendedor um real retorno financeiro. Contudo, métodos mais convencionais como o do *payback* simples e o *payback* descontado, largamente utilizado na análise de investimentos em eficiência energética, não levam em consideração todos os fatores micro e macroeconômicos envolvidos na vida útil desses investimentos.

Dados como os citados anteriormente podem ser obtidos aplicando-se o método da análise do custo de ciclo de vida (CCV). Conforme de Fuller e Petersen (1995), a análise CCV é um método econômico para avaliação de projetos que leva em consideração a somatória de todos os custos associados ao investimento durante o seu tempo de utilização ou vida útil, como aquisição, operação, manutenção e, eventualmente, descarte de um equipamento/processo. Dessa forma, pode-se determinar a viabilidade técnica-econômica a partir de uma boa rentabilidade econômica durante todo o ciclo de vida de um determinado equipamento e/ou empreendimento.

Dessa forma, o presente trabalho pretende avaliar a troca de motores de indução com níveis de rendimento indefinidos, já envelhecidos e, que provavelmente são motores sem definição de classe de rendimento ou classe “standard”, por motores nível IR3 utilizando o

método da análise de custo de ciclo de vida para avaliar o impacto econômico desta troca. As trocas serão feitas de maneira automática com auxílio de software específico de simulação, levando em conta o nível de carregamento do motor. Para realização das trocas, será utilizada a planta industrial apresentada no estudo de Lima *et al.* (2019).

Contudo, serão consideradas plantas filiais semelhantes em regiões diferentes do Brasil (típico em indústrias de bens de consumo de médio e grande porte). Por conseguinte, pretende-se determinar a região do país que traz maior rentabilidade econômica para realização desta ação de eficiência e seus desdobramentos.

### 1.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO NA INDÚSTRIA

No ano de 2019, o consumo elétrico industrial representou aproximadamente 35% do consumo elétrico total do Brasil (BRASIL, 2020). Sabe-se que o MIT, representa uma grande parcela desse consumo, e em algumas indústrias quase que sua totalidade. Conforme apontado por Souza (2018) os motores de indução com rotor gaiola de esquilo (MITRGE) possuem a mais ampla variedade de aplicações, especialmente no setor industrial. As diversas aplicações são justificadas por alguns fatores, dentre os quais se podem destacar:

- a) Apesar de menor performance, o MIT possui baixo custo de aquisição e manutenção se comparado ao motor de imã permanente, seu concorrente direto do no mercado nacional. Isso justifica a grande quantidade de MIT nos parques fabris nacionais.
- b) Características construtivas simples fazem com que ações de manufatura e substituição sejam de fácil execução, dentre as quais se destacam:
  1. Presença do rotor gaiola de esquilo;
  2. Presença de apenas um sistema de partida;
  3. Em menor quantidade necessitam de inversores de frequência ou *soft starter*.
- c) Com os avanços da eletrônica de potência, os conversores de frequência utilizados para controlar a frequência aplicada nos terminais dos motores elétricos possibilitaram o controle de velocidade do Motor de Indução Trifásico com Rotor em Gaiola de Esquilo. (MITRGE). Como consequência disso, reduziu-se a necessidade do uso de motores de indução com rotor bobinado.
- d) Pequenas dimensões, podendo ser utilizado em locais compactos;

- e) Devido a não presença de escovas, o MIT não produz faiscamento. Dessa forma, é possibilitado mais facilmente a sua aplicação em áreas classificadas;
- g) Elevada vida útil, uma vez que, na maioria dos casos, o MIT não necessita de um conversor eletrônico de potência em seu funcionamento;
- i) Não possui contato elétrico entre o rotor e o estator, o contato é realizado apenas pelos mancais, possuindo desta forma, alta segurança de operação;
- j) É energizado em corrente alternada sem a necessidade de conversores CA-CC;

Os MITRGE são responsáveis por mais de 90% do consumo total de eletricidade em motores elétricos (GARCIA, 2003). De construção bastante robusta, sem partes faiscantes, com rendimento na casa de 90% e exigindo pouca manutenção e manutenção de baixo custo (AMERICO, 2003). Conforme (KOSOW, 2005) e WEG (2021), sua aplicação é indicada em localizações remotas, e operação em situações severas de trabalho, mesmo na presença de poeira e outros materiais abrasivos. Características de operação como essa justificam o uso massivo do MITRGE na indústria. Ainda de acordo com Américo (2003), o MITRGE apresenta poucas desvantagens: motor de velocidade constante (motor de velocidade é uma forma de se chamar o mit nas industrias devido a pouca variação de velocidade e grande variação de carregamento ) pequena variação de velocidade, a operação é degradada em baixo carregamento (baixo rendimento e fator de potência) e alta corrente de partida. Dessa forma, é imprescindível desenvolver estudos voltados para eficiência energética no setor industrial levando em consideração a operação dos motores de indução trifásicos.

## 1.2 PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 1, DE 29 DE JUNHO DE 2017

Considerando o impacto do consumo de energia ocasionado pelo parque de motores elétricos trifásicos na matriz energética nacional e, conseqüentemente, a necessidade de zelar pela eficiência energética desses produtos (MME, 2017), foi instituída a Portaria Interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017. A mesma estabelece o nível de rendimento mínimo para MITRGE comercializados para classificação equivalente a IR3 e entrou em vigor em agosto de 2019.

Além disso, o parágrafo 4 da portaria determina que máquinas motrizes tendo por componentes motores ainda com os níveis mínimos de eficiência energética anteriores poderão ser fabricadas e importadas até 1º de março de 2021 e comercializadas para o mercado até 30 de agosto de 2021 (MME, 2017). Em linhas gerais, na presente data de realização deste trabalho

escrito, os motores de índices IR2 (Índice de rendimento 2) já não podem ser mais fabricados e importados.

Logo, o Brasil passa por uma transição onde o MITRGE assume o índice IR3 (Índice de rendimento 3) como valor mínimo de rendimento permitido pelo INMETRO. Dessa forma, haverá uma atualização lenta e gradativa para o índice IR3 na população de motores no Brasil. Entretanto, programas como o projeto prioritário de incentivo a substituição de motores elétricos, da ANEEL, podem acelerar esse processo, como apresentado na seção 1.3 que se segue.

### 1.3 PROJETO PRIORITÁRIO DE INCENTIVO A SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

De acordo com Ministério de Minas e Energia (2011), a indústria consome 43,7% de toda energia elétrica nacional e a força motriz em operação usa 68% dessa energia elétrica. Ainda de acordo com o MME (2011), aproximadamente 30% de toda a energia elétrica do país é consumida por motores elétricos.

Apesar da instituída a Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC 553, de 8 de dezembro de 2005, determinando a obrigatoriedade de níveis mínimos de eficiência para motores de indução trifásicos fabricados a partir de dezembro de 2009, constata-se em pesquisas de mercado que a prática de recondicionamento de motores antigos tem se tornado cada vez mais comum no setor industrial. Logo, como a maioria desses motores possui uma média de vida útil superior a quinze anos e que grande parte dos mesmos é de fabricação anterior a dezembro de 2009, conclui-se que grande parte desses motores não atende aos níveis mínimos de eficiência definidos (BRASIL, 2015).

Tal informação pode ser corroborada por Sauer *et al.* (2015), que afirma que mesmo muitos anos após a implantação da Portaria 553/2005, os MITRGE comercializados no Brasil ainda estavam com rendimento significativamente abaixo do mínimo permitido.

Diante desse cenário, foi instituído pela ANEEL o projeto prioritário de incentivo a substituição de motores elétricos, tendo este passado por processo de recondicionamento ou não, por motores mais eficientes e que atendam a regulamentação vigente de padrões mínimos. Com a implantação do programa tinha-se em vista as seguintes perspectivas (ANEEL, 2015):

- Possibilitar o setor industrial de manter, ou ainda aumentar, sua atividade produtiva consumindo menos energia elétrica devido à aquisição e utilização de motores elétricos mais

modernos e eficientes;

- Atualização do parque de motores elétricos utilizados no setor industrial brasileiro;
- Diminuir e tornar menos atrativa a prática de rebobinagem de motores elétricos sem critérios técnicos ou para a simples reposição de motores danificados, além da utilização de motores antigos e pouco eficientes.

Entretanto, um ponto sensível em relação projeto prioritário está em não levar em consideração o carregamento do motor ao estimular a substituição do mesmos.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Como apresentado nas seções anteriores, a regulamentação dos índices mínimos de rendimento de motores se apresenta como um dos pilares na busca pela eficiência energética no Brasil. Aliado a isso, a troca de motores de indução no setor industrial vigora como investimento efetivo na busca de economia por parte dos empreendedores.

Entretanto, um ponto sensível na realização da troca de motores se dá na falta de estudos que apresentem dados econômicos mais próximos da realidade para aqueles que querem investir. A fim de atestar a viabilidade da troca, os estudos devem levar em consideração a realidade econômica, o regime de fornecimento de energia elétrica no país e o padrão de consumo industrial brasileiro, além de contemplar a região que o empreendimento está inserido e a classe de consumo, a fim de determinar as melhores condições para os investidores.

Sob este prisma, o presente estudo se propõe a determinar valores precisos sobre a rentabilidade da troca de MITRGE no setor industrial utilizando o método da análise do custo de ciclo de vida, contemplando alguns fatores e parâmetros micro e macroeconômicos envolvidos na vida útil desses investimentos a fim de dar a confiabilidade necessária a estas análises técnico-econômicas fortemente realizadas nos dias de hoje.

O referido trabalho se apoia nas diretrizes do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica (ANEEL, 2021) e se enquadra no tema que busca por novas metodologias para avaliação de resultados de projetos de eficiência energética.

#### 1.5 ESTADO DA ARTE

Nos últimos anos, vários trabalhos tem usado a análise dos custos do ciclo de vida (CCV) de projetos comparando-os e verificando qual o projeto ou equipamento mais viável. O método CCV pode ser aplicado a uma variedade de projetos em áreas distintas de conhecimento. Nilsson e Bertling (2007) aplicaram a análise do custo de ciclo de vida em um

estudo de caso real. A análise CCV foi aplicada no gerenciamento de manutenção de parques eólicos offshore localizados no reino unido. Foram encontradas melhorias com o uso do método e as mesmas foram aplicadas nas planilhas de planejamento dos parques estudados.

Em estudo mais recente, Abas et Al (2019) investigou a viabilidade da implementação de veículos elétricos no mercado de Brunei utilizando análise CCV. Apesar de direcionada a um mercado em específico, tal estudo por utilizar um método universal de análise, pode ser aplicado a qualquer mercado. Os autores concluíram que, apesar de serem mais econômicos no decorrer da sua vida útil, os veículos elétricos ainda apresentam um custo inicial elevado, inviabilizando sua rentabilidade em relação aos veículos comuns, movidos a combustível fóssil.

Em seu estudo, Aguiar (2018) fez o uso da análise CCV a fim de determinar a viabilidade técnica e a rentabilidade de motores elétricos de indução de baixa potência que têm seu rendimento melhorado após a rebobinagem com critérios técnicos bem estabelecidos. O autor concluiu que os motores rebobinados possuem uma maior rentabilidade em relação à troca por motores IR3/IE3/Premium diretamente vendidos no mercado. Além disso, com a análise CCV foi possível determinar que o maior tempo de retorno dos motores rebobinados em relação a troca convencional de motores é de 2 anos.

Andrade e Pontes (2017) através da análise do custo de ciclo de vida, se propõem analisar a viabilidade econômica das transições dos padrões mínimos de eficiência exigidos (Minimum Energy Performance Standards – MEPS) para motores elétricos no Brasil, E.U.A e Europa considerando a incerteza dos parâmetros envolvidos. Em seguida os autores estimam os efeitos desse programa nas metas de economia de energia para o horizonte de 2030, no caso brasileiro. O estudo conclui a viabilidade da implementação dos novos índices mínimos de eficiência no Brasil. Além disso, o estudo apresentou resultados que mostram a viabilidade econômica troca de motores IR2 por motores IR3 em todos os cenários simulados.

Em trabalho desenvolvido por Celik (2004), foi montado um cenário baseado no projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede localizado na cidade de Ancara a fim de determinar através da análise CCV a viabilidade técnico-econômica do sistema em questão. O estudo mostrou que o custo do kWh do sistema fotovoltaico é de 3 a 4 vezes menor que o custo do kWh convencional. Entretanto, o sistema projetado possui um banco de baterias de armazenamento. Dessa forma, o custo do kWh do sistema pode ser drasticamente reduzido mantendo-se apenas o sistema fotovoltaico conectado à rede e retirando-se o banco de baterias.

Lima *et al.* (2020) realizou um estudo em uma planta industrial real intuito de comprovar a eficácia do método CCV em estudos relacionados à troca de motores industriais menos eficientes (IR2) por motores mais eficientes (IR3). O estudo foi mais direcionado aos motores subdimensionados da indústria estudada. Os autores aplicaram com êxito a análise do custo de ciclo de vida. Os resultados preliminares mostraram que a troca de dois dos quatro maiores motores elétricos subdimensionados geram rentabilidades em torno de R\$ 40.000,00 durante a vida útil do novo motor, onde o investimento para aquisição destes dois motores custou apenas R\$20.000,00.

## 1.6 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Determinar, com confiabilidade, informações relativas à viabilidade e rentabilidade da troca de motores elétricos por motores mais eficientes, em empresas industriais de médio porte que possui unidades fabris semelhantes situados em regiões distintas do Brasil.

Para cumprir o objetivo principal, propõem-se os seguintes objetivos secundários:

- Obtenção de dados referentes a consumo (por classe e região), índice de inflação IPCA e receita bruta de consumo.
- Obtenção da taxa de escalada da energia elétrica por região do país para classe de consumo industrial.
- Aplicação do método da análise do custo do ciclo de vida para troca de motores de indução trifásicos.
- Criação de um programa computacional para simular a troca de motores e realizar as análises estatísticas necessárias à simulação.
- Simular a troca de motores em parques industriais situados em regiões distintas do país
- Analisar os resultados obtidos após as simulações, a fim de determinar a região mais rentável para ser realizada a troca e outras implicações.

Para tanto, o presente estudo será dividido em seis capítulos, os quais são descritos a seguir:

- Capítulo 2: Será apresentado todo embasamento teórico para o estudo de rentabilidade da troca de motores pelo método da análise do custo de ciclo de vida (CCV):

- Capítulo 3: Nessa seção, será apresentado todo embasamento teórico referente a realização da troca de motores levando-se em conta o carregamento. De maneira subsequente será mostrado o estudo de caso introdutório referente à troca de motores em uma indústria com média população de motores em seu parque fabril e considerando que esta empresa tenha unidades industriais em regiões distintas do Brasil.
- Capítulo 4: A seção tratará de todas as informações à cerca do simulador utilizado para realização automática da troca de motores, bem como todas as funções nele inseridas.
- Capítulo 5: Aqui serão apresentados todos os resultados obtidos após as simulações de troca de motores em uma indústria de médio porte com unidades fabris localizadas nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil.
- Capítulo 6: Por conseguinte, nesta seção serão apresentadas avaliações técnicas e econômicas dos resultados apresentados, bem como as conclusões do referido estudo e as propostas de trabalhos futuros.

## 2 ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA

Nesta seção será apresentado todo o embasamento teórico necessário para a realização do estudo da rentabilidade de um empreendimento em eficiência energética pelo método da análise do custo de ciclo de vida (CCV): a troca dos motores de uma empresa industrial que possua mais de uma unidade fabril.

Para isso, serão apresentados os principais conceitos à cerca os custos de ciclo de vida, toda modelagem matemática envolvida no processo, bem como a análise CCV para troca de motores de indução trifásico no setor industrial levando em consideração a premissa do parágrafo anterior.

### 2.1 VALOR PRESENTE

Andrade (2017) define o valor presente (VP) como uma atualização dos valores monetários dos custos do ciclo de vida para a data do início do fluxo de caixa do projeto, o que permite a comparação adequada de custos e benefícios associados à melhoria de eficiência.

A expressão do valor presente líquido (*VPL*) depende da forma como o fluxo de caixa é realizado (FULLER; PETERSEN, 1995). A equação (1) apresenta o valor presente para um montante futuro de dinheiro que ocorre apenas no final de um ano  $t$ , também conhecido como valor presente único (*VPU*).

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

Onde,  $F_t$  representa o valor único de caixa,  $d$  é a taxa de desconto utilizada e  $t$  é o tempo da análise (em anos). Outra expressão para o VP é utilizada para operações em que o fluxo de caixa baseado em uma sequência de valores iguais no decorrer do tempo em intervalos regulares. Essa expressão é conhecida como valor presente líquido uniforme (*VPU<sub>u</sub>*) e é apresentada pela equação (2).

$$VPU_u = A_0 \cdot \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+d)^t} = A_0 \cdot \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^n} \quad (2)$$

Onde,  $A_0$  representa o fluxo de caixa e  $n$  o intervalo em que o fluxo de caixa ocorre e  $t$ , neste caso, é cada período de tempo da análise com custos uniformemente distribuídos no

futuro. Na análise do custo de ciclo de vida, este tipo de fluxo está representado pelos custos de operação, manutenção, descarte e até custos ambientais (Andrade, 2017).

Para um fluxo de caixa que se repete periodicamente, mas que muda ano a ano a uma taxa de escalada constante ( $\hat{e}$ ), como ocorre com custos relacionados à energia, a expressão do valor presente é dada pela equação (3) e conhecida como valor presente uniforme modificado.

$$VPUM = \sum_{t=1}^n A_0 \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t = A_0 \cdot \frac{(1+\hat{e})}{(d-\hat{e})} \left[ 1 - \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^n \right] \quad (3)$$

Onde,  $A_0$  representa o custo total em determinado período,  $d$  a taxa de desconto.  $\hat{e}$  a taxa de escalada da energia.

### 2.3 TAXA DE DESCONTO NA ANÁLISE DO CCV

A taxa de desconto  $d$  também conhecida como custo de capital, é uma variável fundamental no processo análise do custo de ciclo de vida. Através da mesma, é possível atualizar os fluxos de caixa do programa de eficiência para o valor presente. A determinação da taxa de desconto leva em consideração fatores políticos e custos de oportunidade (STEINBACH; STANIASZEK, 2015a).

De acordo com Andrade (2017), a taxa de desconto  $d$  é usada na análise do CCV da melhoria de eficiência de equipamentos porque os benefícios esperados ocorrem em um intervalo de tempo que pode ultrapassar 20 anos. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece uma taxa de desconto de 12% para projetos de eficiência energética (ANEEL, 2008). A taxa de desconto tem o mesmo objetivo que a taxa de interesse  $i$ , sendo que esta última é definida diretamente pelo mercado (THORNTON, 1980).

Para empreendimentos com tempos de planejamento e/ou construção, algumas considerações especiais serão feitas nos custos anuais recorrentes antes de descontá-los do valor presente, conforme apontado por (FULLER; PETERSEN, 1995). Inicialmente, deve ser calculado o fator  $(1+\hat{e})/(1+d)$  para o tempo total do estudo (tempo de construção/planejamento + tempo de vida útil do empreendimento). Em seguida, calcula-se o mesmo fator levando-se em conta apenas o tempo de construção/planejamento do empreendimento. Por fim, através da diferença positiva entre os dois fatores calculados obtém-se o fator resultante a ser considerado no estudo.

A equação (4) ilustra matematicamente os passos citados anteriormente por meio de uma fórmula definitiva para o cálculo do valor presente líquido para empreendimentos com tempos de planejamento e/ou construção ( $VPL_{P\&C}$ ).

$$VPL_{P\&C} = C_t \left[ \sum_{t=1}^n \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^{(t+tp+tc)} - \sum_{t=1}^n \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^{(tp+tc)} \right] \quad (4)$$

Onde,  $C_t$  representa o custo total em determinado período e  $t$  a quantidade de anos do empreendimento,  $tp$  a quantidade de anos utilizados para planejamento e  $tc$  quantidade de anos utilizados durante a construção.

No presente trabalho será utilizada a taxa de desconto real. A mesma não leva em consideração a taxa de inflação, o que a diferencia da taxa de desconto nominal. Dessa forma, os valores monetários trabalhados serão constantes (real), e não correntes (nominal). Importante salientar que ambas as taxas, quando aplicadas a valores futuros, apresentam o mesmo valor presente *líquido* (ANDRADE, 2017).

#### 2.4 TAXA DE ESCALADA DA ENERGIA ELÉTRICA

Em linhas gerais, a taxa de escalada representa o quanto o custo de um item sobe acima da inflação durante o período de estudo do projeto (ANDRADE, 2017). Entretanto, custos relacionados à energia elétrica, no Brasil, apresentam um comportamento diferenciado dos demais custos, muito em consequência da variação dos preços das tarifas de forma desassociada da taxa de inflação, obedecendo, entre outros fatores, à variação dos preços das commodities do setor de energia. (PROGRAMME,2000).

No caso específico da eletricidade, a forma de geração implica diretamente no preço da tarifa, bem como a disponibilidade de recursos e até a dependência da importação de produtos (XUEWEI; MORENO-CRUZ; CRITTENDEN, 2015). Comportamentos como esses reforçam a necessidade da importância do estudo da taxa de escalada não somente para investimentos e análises de ciclo de vida, mas também o impacto de tal taxa no dia a dia do consumidor comum.

De acordo com Aguiar, Pontes e Ferreira (2018) a taxa de escalada da tarifa de energia ( $\hat{e}$ ) é dado pela diferença entre a tarifa de energia elétrica analisada em um determinado ano e a inflação do mesmo ano ( $e(t)$ ). A equação (5) apresenta a taxa de escalada de energia onde  $n$  é o número de anos utilizados na série avaliada.

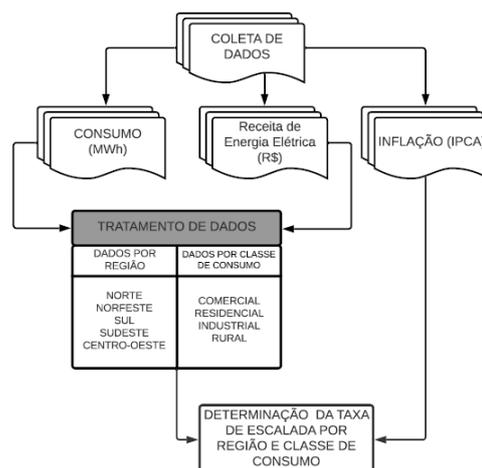
$$\hat{e} = \frac{\sum_{t=1}^{n^*} e(t)}{n^*} \quad (5)$$

A equação (5) apresentada é a formulação matemática que melhor aproxima a taxa de escalada, onde  $n^*$  representa a quantidade de anos da análise da série histórica das tarifas de energia elétrica e da inflação. Entretanto, a taxa de escalada da energia elétrica poderá ser obtida por outras formas, conforme apresentado na seção 2.5.

## 2.5 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ESCALADA DA ENERGIA ELÉTRICA

O fluxograma apresentado na Figura 1 ilustra de forma clara as etapas necessárias para o processo de obtenção da taxa de escalada da tarifa de energia elétrica.

Figura 1. Fluxograma para obtenção de taxa de escalada de energia elétrica.



Fonte: Autor, 2021.

Com base na figura 1, pode-se inferir que a taxa de escalada de energia elétrica é obtida por meio de dados referentes ao consumo e receita de energia elétrica, aliados aos dados do índice de inflação IPCA, que se refere ao *Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo*. As subseções de 2.5.1 à 2.5.4 apresentam de maneira clara os processos necessários para obtenção da taxa de escalada da tarifa de energia elétrica.

### 2.5.1 Coleta de Dados de Consumo e Receita de Energia Elétrica nas Distribuidoras do Brasil

Para fins do presente estudo, foram coletados dados do consumo de energia elétrica e de sua receita correspondente entre os anos de 1996 e 2019 para diferentes classes de consumo. O ano de 1996 marca a criação e início da ANEEL, por isso, o mesmo foi escolhido como ponto

de partida inicial para o cálculo da taxa de escalada. Todos dados utilizados no referido estudo foram obtidos através de relatórios da ANEEL, onde os mesmos são organizados por ano, mês, região e classe de consumo, levando em consideração as concessionárias de energia de cada região. A tabela 1 ilustra os dados de consumo e receita de energia elétrica no Brasil entre os anos de 1996 e 2020.

Tabela 1. Consumo e receita de energia elétrica no Brasil entre os anos de 1996 e 2020

Ano	Consumo de Energia Elétrica (MWh)	Receita de Fornecimento de Energia Elétrica (Reais)
1996	237063955	R\$ 18.575.188.735,00
1997	256118579	R\$ 22.081.496.790,00
1998	265741379	R\$ 24.220.580.439,00
1999	271289291	R\$ 27.265.289.945,00
2000	284941261	R\$ 32.402.139.783,00
2001	263122110	R\$ 33.848.672.141,00
2002	266553475	R\$ 39.935.198.169,00
2003	267096886,76	R\$ 48.716.379.094,76
2004	265457320,80	R\$ 56.672.410.728,80
2005	253260853,87	R\$ 61.426.214.861,28
2006	252107694,65	R\$ 64.706.373.433,80
2007	263215699,91	R\$ 68.122.958.570,12
2008	278592020,72	R\$ 68.838.701.970,26
2009	286871824,22	R\$ 74.456.147.481,54
2010	302355009,10	R\$ 79.998.138.965,79
2011	310397202,12	R\$ 86.434.360.145,16
2012	319871828,56	R\$ 93.674.926.325,39
2013	329187691,97	R\$ 83.761.044.763,83
2014	345379214,88	R\$ 95.660.935.432,92
2015	341983793,60	R\$ 135.097.850.678,00
2016	330115720,98	R\$ 138.365.603.380,64
2017	313654178,26	R\$ 132.346.489.124,29
2018	312704882,65	R\$ 148.532.503.430,32
2019	316482217,46	R\$ 161.871.445.313,98
2020	303002069,56	R\$ 154.372.797.880,07

Fonte: Adaptado de ANEEL,2021.

Em posse dos referidos dados, é possível obter a tarifa média de eletricidade por classe de consumo, que se dá através da razão entre o consumo de energia elétrica e sua receita de fornecimento. Foram construídas tabelas semelhantes a tabela 1, com dados relativos à consumo e receita para todas as cinco regiões do Brasil, conforme apresentado no apêndice A.

### 2.5.2 Coleta de Dados de Índice de Inflação IPCA

O IBGE é o órgão responsável por produzir o IPCA, sendo este o índice oficial de inflação no Brasil. De acordo com o IBGE (2020) o IPCA tem por objetivo medir a inflação de um conjunto de produtos e serviços comercializados no varejo, referentes ao consumo pessoal das famílias, o mesmo abrange consumidores que vivem com renda de 1 a 40 salários mínimos.

O índice é calculado mês a mês, podendo assim ser verificado o aumento ou diminuição dos preços.

Assim, para obtenção da taxa de escalada, fez-se necessário a realização da coleta dos índices de inflação acumulados mês a mês entre os anos de 1996 e 2020. Os dados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. IPCA acumulado entre os anos de 1996 e 2020

Ano	IPCA Acumulado no ano	Ano	IPCA Acumulado no ano
1996	9,56%	2009	4,31%
1997	5,22%	2010	5,91%
1998	1,65%	2011	6,50%
1999	8,94%	2012	5,84%
2000	5,97%	2013	5,91%
2001	7,67%	2014	6,41%
2002	12,53%	2015	10,67%
2003	9,30%	2016	6,29%
2004	7,60%	2017	2,95%
2005	5,69%	2018	3,75%
2006	3,14%	2019	4,31%
2007	4,46%	2020	4,51%
2008	5,90%		

Fonte: Adaptado de IBGE, 2021.

### 2.5.3 Estratificação dos dados de Consumo e Receita de Energia Elétrica

Com a posse dos dados, fez-se possível a estratificação dos valores de consumo e receita que serão utilizados no presente estudo. Os dados foram separados de duas formas: Consumo (*EC*) e Receita (*RE*) para classe de consumo industrial por região do Brasil e consumo e receita para classe de consumo residencial por estado da região nordeste. Com os dados de receita e consumo separados, pode-se obter a tarifa média da eletricidade ( $Tf_{média}$ ), conforme apresentado da equação (6).

$$Tf_{média} = \frac{RE(R\$)}{EC(MWh)} \quad (6)$$

A tabela 3 apresenta a tarifa média de fornecimento para a classe de consumo industrial para as regiões centro oeste, sul, sudeste, Norte e Nordeste. Todos os dados relativos a consumo e receita por região do país para classe de consumo industrial estão apresentados no apêndice A do presente trabalho.

Tabela 3. Tarifa média de fornecimento para classe de consumo industrial por região do Brasil entre os anos de 1996 e 2020

Tarifa Média de Fornecimento (R\$/MWh)					
Ano	Centro-Oeste	Sul	Sudeste	Norte	Nordeste
1996	57,45	61,89	52,82	89,15	62,60
1997	62,05	66,86	56,73	92,78	66,23
1998	67,56	67,37	59,21	102,51	68,34
1999	74,08	72,59	66,27	103,92	72,60
2000	82,02	80,75	75,07	106,47	78,47
2001	93,14	92,58	87,12	107,73	89,05
2002	103,22	107,10	102,37	124,84	102,22
2003	136,63	122,45	131,66	151,08	132,78
2004	178,08	155,76	157,37	170,06	158,31
2005	216,34	173,00	199,37	198,10	186,50
2006	229,33	194,83	221,27	224,91	214,71
2007	217,73	206,22	233,14	217,50	218,99
2008	199,97	207,19	220,36	230,94	208,12
2009	211,48	215,24	240,61	254,45	212,90
2010	218,47	228,57	242,21	199,60	224,43
2011	225,27	246,03	249,23	250,33	238,35
2012	225,32	257,95	258,82	273,78	258,08
2013	200,00	215,67	232,61	226,81	216,92
2014	217,55	247,92	258,24	244,56	239,21
2015	330,61	395,18	397,41	309,23	313,88
2016	344,94	401,18	419,88	361,17	337,31
2017	380,18	397,16	406,17	433,44	369,33
2018	463,44	449,38	459,30	497,37	411,49
2019	480,67	473,12	491,68	524,86	430,38
2020	511,47	467,03	491,16	510,48	456,08

Fonte: Autor, 2021.

#### 2.5.4 Obtenção da Taxa de Escalada da Energia Elétrica

Através dos dados estratificados apresentados na subseção 2.4.3, faz-se possível a obtenção da taxa de escalada da energia elétrica por região ou por estado, a depender da classe de consumo, mediante os objetivos do estudo. Inicialmente, para obtenção da taxa, calcula-se o crescimento percentual da tarifa média de energia elétrica, conforme apresentado pela equação (7).

$$T_{crescimento\_tarifa}(\%) = \frac{Tarifa_{Média\_Anual}}{Tarifa_{Média\_Ano\_base}} \quad (7)$$

Onde,  $Tarifa_{Média\_Anual}$  é a tarifa média anual e  $Tarifa_{Média\_Ano\_base}$  é a tarifa média do ano base utilizado. Para fins de exemplificação, a tabela 4 apresenta a taxa de crescimento percentual para a classe de consumo industrial da região sudeste do Brasil. Considera-se como ano base o ano de 1996, ano inicial da coleta de dados realizada.

Tabela 4. Taxa de crescimento da Tarifa média de fornecimento para classe de consumo industrial para região sudeste do Brasil entre os anos 1996 e 2020.

Ano	Tarifa Média de Fornecimento (R\$/MWh)	Taxa percentual de Crescimento (1996 =1)
1996	52,82	1,000
1997	56,73	1,074
1998	59,21	1,121
1999	66,27	1,255
2000	75,07	1,421
2001	87,12	1,649
2002	102,37	1,938
2003	131,66	2,493
2004	157,37	2,979
2005	199,37	3,775
2006	221,27	4,189
2007	233,14	4,414
2008	220,36	4,172
2009	240,61	4,555
2010	242,21	4,586
2011	249,23	4,718
2012	258,82	4,900
2013	232,61	4,404
2014	258,24	4,889
2015	397,41	7,524
2016	419,88	7,949
2017	406,17	7,690
2018	459,30	8,696
2019	491,68	9,309
2020	491,16	9,299

Fonte: Autor, 2021.

Através dos dados percentuais apresentados na tabela 4 observa-se que passados vinte e cinco anos, houve um aumento de aproximadamente 830% entre o preço da tarifa média no ano de 1996 e 2020.

Outro dado necessário para obtenção da taxa de escalada é o crescimento acumulado da inflação entre os anos de 1996 e 2020, tomando-se como base o ano de 1996. O mesmo foi obtido com base nos dados apresentados na tabela 2 do presente trabalho. A equação (8) apresenta a fórmula utilizada para o cálculo do crescimento acumulado da inflação.

$$T_{\text{crescimento\_inflação}}(\%) = (1 + \text{Inflação}_{\text{anual}}) \times T_{\text{crescimento\_ano\_anterior}} \quad (8)$$

Onde,  $\text{Inflação}_{\text{anual}}$  representa a inflação ano a ano e  $T_{\text{crescimento\_ano\_anterior}}$  é taxa de crescimento do ano anterior. A tabela 5 apresenta o crescimento percentual acumulado da inflação entre 1996 e 2020.

Tabela 5. Taxa de crescimento acumulado da inflação entre os anos 1996 e 2020.

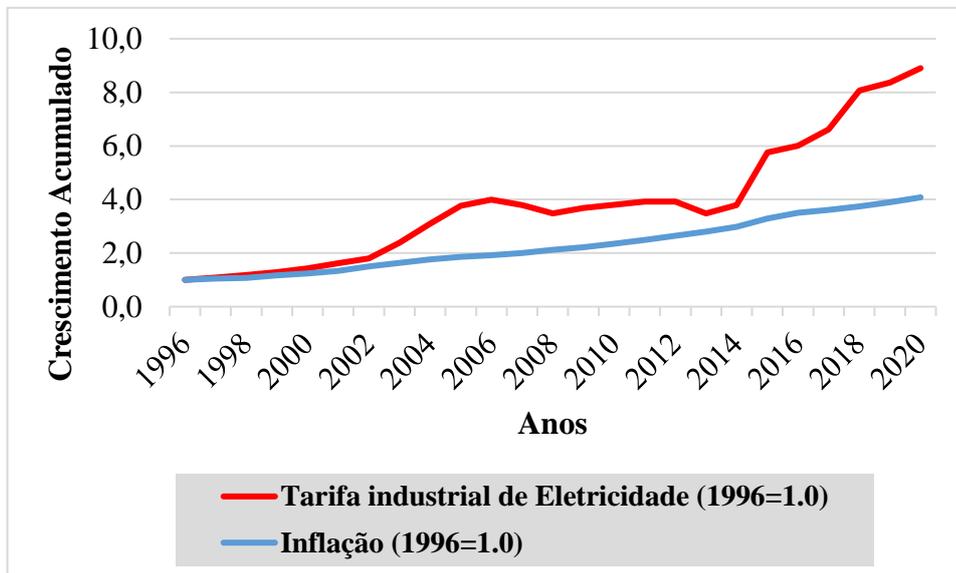
<b>Ano</b>	<b>Taxa de Crescimento</b>	<b>Ano</b>	<b>Taxa de Crescimento</b>
1996	1,000	2009	2,213
1997	1,052	2010	2,344
1998	1,070	2011	2,496
1999	1,165	2012	2,642
2000	1,235	2013	2,798
2001	1,329	2014	2,978
2002	1,496	2015	3,295
2003	1,635	2016	3,503
2004	1,759	2017	3,606
2005	1,860	2018	3,741
2006	1,918	2019	3,902
2007	2,003	2020	4,078
2008	2,122		

Fonte: Autor, 2021

Conforme apresentado na tabela 5, observa-se que ao longo dos vinte e cinco anos foi calculado um crescimento da inflação acumulado de 407% em relação ao ano base de 1996.

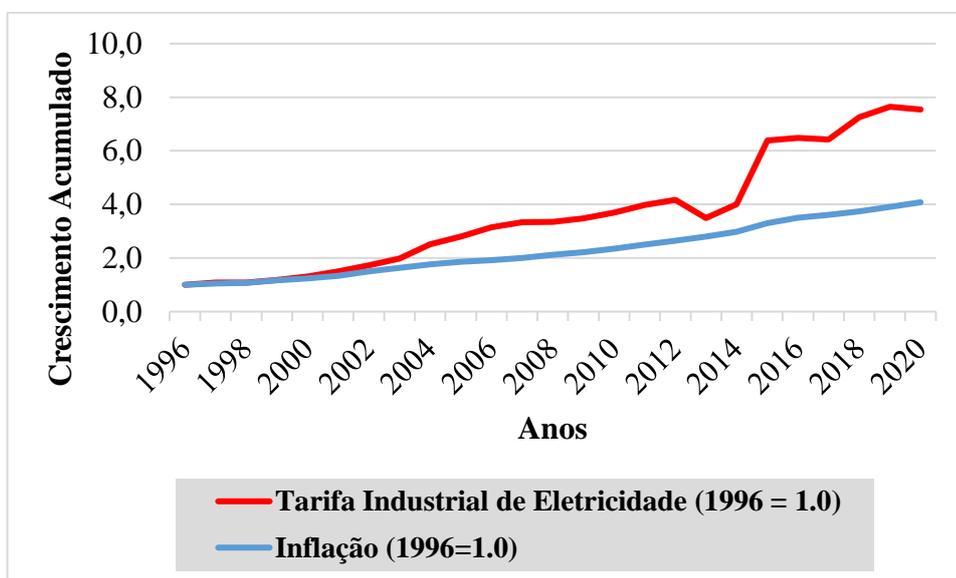
Com o crescimento percentual da tarifa média e o crescimento acumulado da inflação em mãos, foram gerados os gráficos ilustrados nas figuras 2, 3, 4, 5 e 6 onde é apresentada a curva de crescimento do valor da tarifa média de energia elétrica para classe de consumo industrial por região do Brasil em relação às taxas de inflação (vide tabela 2) compreendidas entre os anos de 1996 e 2020.

Figura 2. Variação da tarifa média acumulada de energia elétrica para classe de consumo industrial na região centro-oeste do Brasil em relação a inflação acumulada entre os anos de 1996 e 2020.



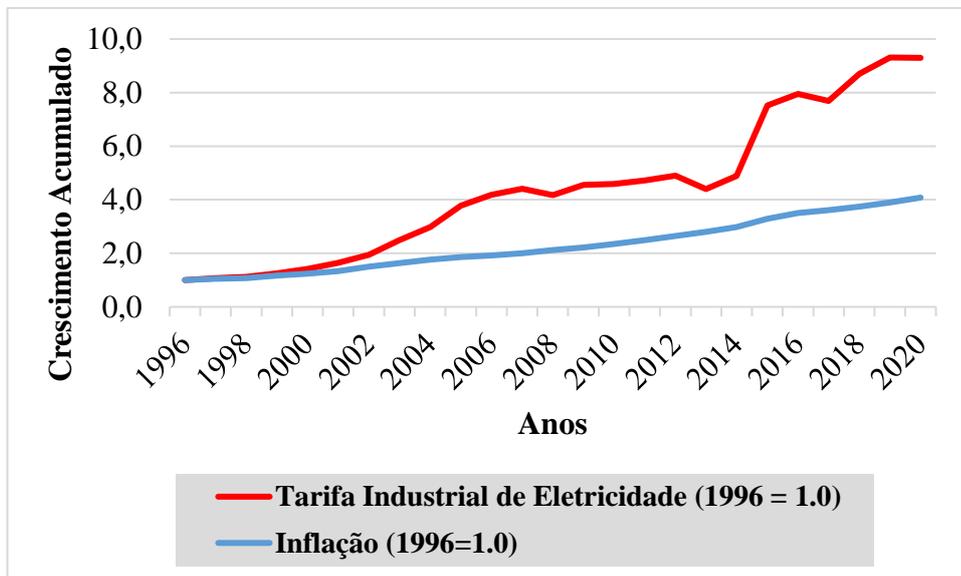
Fonte: Autor, 2021.

Figura 3. Variação da tarifa média de energia elétrica para classe de consumo industrial na região Sul do Brasil em relação a inflação entre os anos de 1996 e 2020.



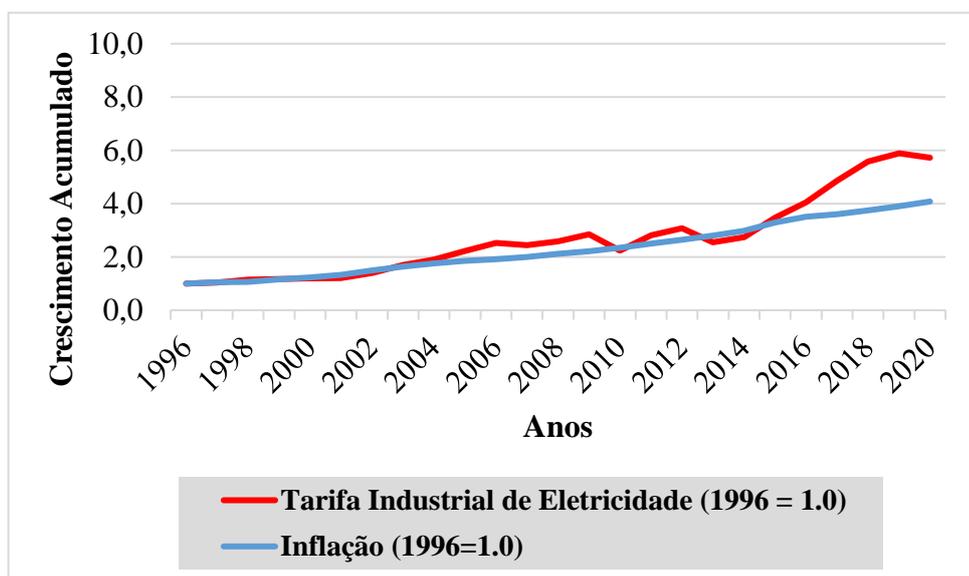
Fonte: Autor, 2021.

Figura 4. Variação da tarifa média de energia elétrica para classe de consumo industrial na região Sudeste do Brasil em relação a inflação entre os anos de 1996 e 2020.



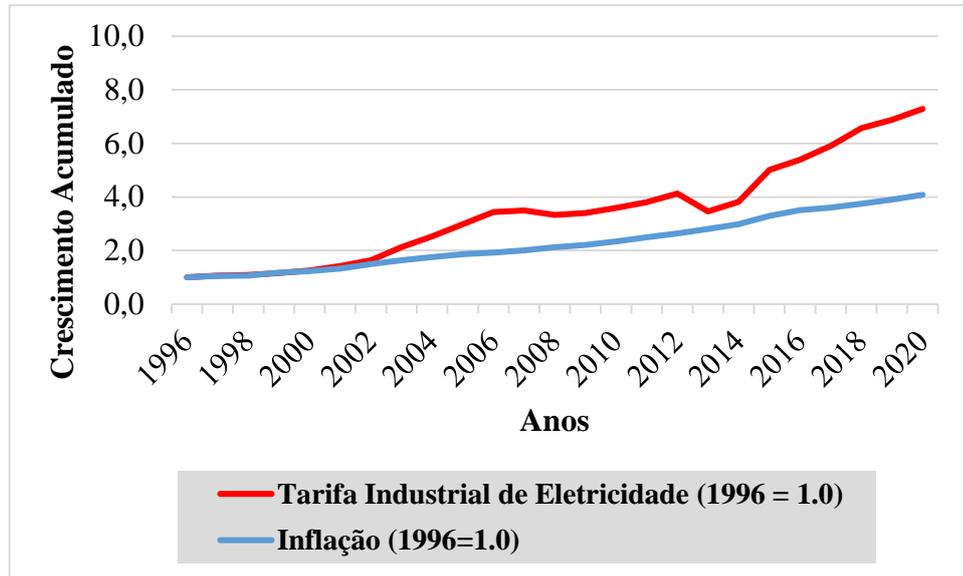
Fonte: Autor, 2021.

Figura 5. Variação da tarifa média de energia elétrica para classe de consumo industrial na região Norte do Brasil em relação a inflação entre os anos de 1996 e 2020.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 6. Variação da tarifa média acumulada de energia elétrica para classe de consumo industrial na região Nordeste do Brasil em relação a inflação acumulada entre os anos de 1996 e 2020.



Fonte: Autor, 2021.

Ainda com base nos valores encontrados do crescimento acumulado da tarifa média e o crescimento acumulado da inflação em mãos, pode-se calcular a taxa de crescimento acumulada de ambos ao longo dos vinte e cinco anos de estudo. A equação (8) apresenta a expressão matemática da taxa acumulada.

$$T_{acum} = (M_{final})^{1/k} - 1 \quad (8)$$

Onde,  $M_{final}$  representa o crescimento acumulado e  $k$  a quantidade de anos de acúmulo.

Por fim, obtém-se a taxa de escalada de energia, dada pela equação (9).

$$\hat{e} = \left( \frac{1 + T_{acum\_tarifa}}{1 + T_{acum\_inflação}} \right) - 1 \quad (9)$$

Onde,  $T_{acum\_tarifa}$  e  $T_{acum\_inflação}$  são as taxas acumuladas da tarifa de energia e da inflação, respectivamente. A tabela 6 ilustra a taxa de escalada obtida para classe de consumo industrial por região do Brasil.

Tabela 6. Taxa de Escalada para Classe de Consumo Industrial por região do Brasil.

<b>Classe de Consumo Industrial</b>	
<b>Região</b>	<b>Taxa de Escalada (%)</b>
Sudeste	3,35
Centro-Oeste	3,17
Sul	2,54
Nordeste	2,35
Norte	1,37

Fonte: Autor, 2021.

### 2.5.5 Determinação da melhor região do Brasil na classe de consumo industrial para realização da troca de motores

A subseção se propõe a analisar a melhor região do Brasil, ou seja, a região mais rentável para se realizar a troca de motores de indução mais eficientes na classe de consumo industrial.

Para isso, inicialmente é calculado o fator  $(1+\hat{e})/(1+d)$ . O mesmo é obtido aplicando-se os valores de taxa de escalada por classe de consumo apresentados na tabela 6. Para o presente estudo, foi considerada a taxa de desconto ( $d$ ) de 12% ao ano, que é geralmente utilizada para setores empresariais, conforme apresentado na seção 2.2.

A tabela 7 apresenta o fator  $(1+\hat{e})/(1+d)$  para a classe de consumo industrial para cada região do Brasil.

Tabela 7. Fator  $(1+\hat{e})/(1+d)$  para Classe de Consumo industrial por região do Brasil.

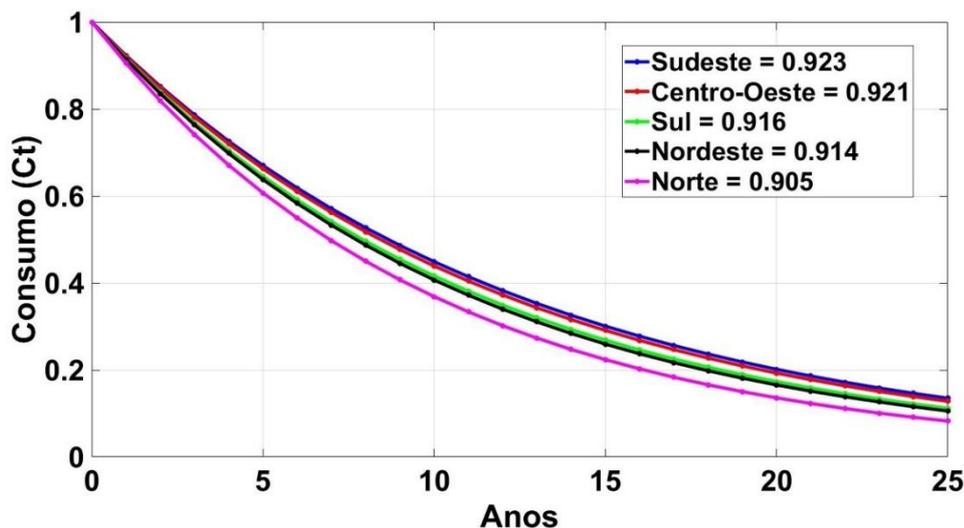
<b>Classe Industrial</b>	$\left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)$
Norte	0,923
Nordeste	0,921
Centro-Oeste	0,916
Sudeste	0,914
Sul	0,905

Fonte: Autor, 2021.

Dessa forma, fez-se possível gráfico do VPUM (Eq. 3) para os fatores  $(1+\hat{e}) / (1+d)$  apresentados na tabela 7. Foi considerado um tempo de vida útil de 25 anos, que é o tempo

médio de vida útil de um motor de indução de média potência (ANDRADE,2017). O consumo  $C_i$  foi considerado unitário. A figura 7 apresenta o gráfico do valor presente, ano a ano, por região do Brasil e classe de consumo industrial para um horizonte de 25 anos.

Figura 7. Valores Presentes, ano a ano, por região do Brasil e classe de consumo industrial para um horizonte de 25 anos.

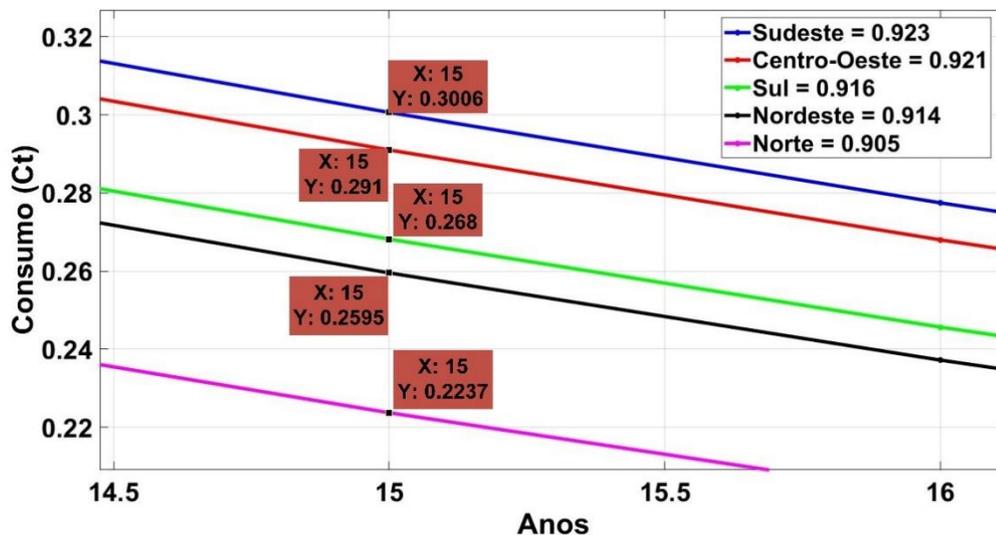


Fonte: Autor, 2021.

Através da figura 7 é possível notar a atualização monetária dos VP para um tempo de ciclo de vida de um motor de indução de média potência a partir do fluxo de caixa do projeto, o que permite a comparação adequada de custos e benefícios associados à melhoria de eficiência da troca do referido motor. A figura 8 apresenta uma aproximação para 15 anos do gráfico apresentado na figura 7.

Através na figura 8 é possível notar de maneira mais precisa a curva de atualização monetária do valor inicial do investimento. No período de 15 anos houve uma redução na atualização monetária, ou seja, uma desvalorização de aproximadamente 70%, 71%, 73,2%, 74,05% e 77,6% para os valores base de 0,923, 0,921, 0,916, 0,914 e 0,905 respectivamente.

Figura 8. Valor Presente Líquido por região do Brasil e classe de consumo industrial para o valor de 15 anos.



Fonte: Autor, 2021.

Assim, após 15 anos da troca de um determinado motor, o montante investido nessa troca valerá apenas 30%, 29%, 26,8%, 25,95% e 22,4% do valor investido hoje. A tabela 8 apresenta o resumo dos valores obtidos na figura 8.

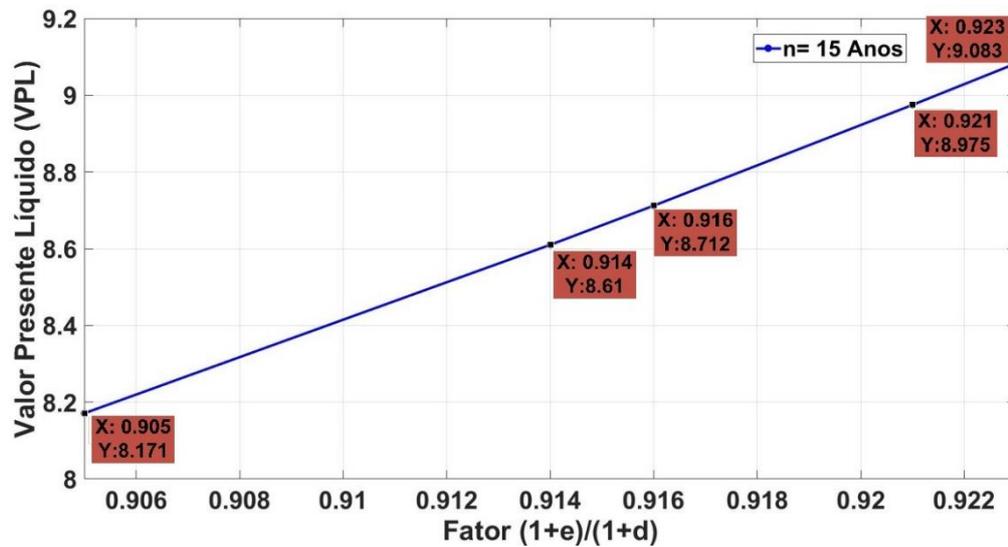
Tabela 8. Atualização monetária para classe de consumo industrial por região do Brasil para o horizonte de 15 anos.

Classe Industrial	Desvalorização Monetária (%)	Valor Investido após Desvalorização Monetária
Sudeste	70	30% do valor inicial investido
Centro-Oeste	71	29% do valor inicial investido
Sul	73,2	26,8% do valor inicial investido
Nordeste	74,05	25,95% do valor inicial investido
Norte	77,6	22,4% do valor inicial investido

Fonte: Autor, 2021.

Com base nesses dados, a região sudeste apresentou o menor índice de atualização monetária e aparentemente é a região do Brasil com maior rentabilidade para troca de motores de indução. A figura 9 corrobora com a afirmação acima. Na mesma é apresentado o gráfico do VPL obtido através do somatório do fator  $(1+\hat{e}) / (1+d)$  para um valor de  $C_t$  constante e um ciclo de vida de 15 anos.

Figura 9. Variação do Valor Presente Líquido com base no fator  $(1+\hat{e}) / (1+d)$  para um ciclo de 15 anos.



Fonte: Autor, 2021.

Através da figura 9 observa-se que a região sudeste (base 0,923) apresenta o maior VPL entre as regiões do Brasil. Tal índice corrobora com a informação anterior, aparentando ser a região mais rentável para projetos de eficiência energética para o setor industrial, seguida de perto pela região centro-oeste do país. A tabela 9 apresenta o percentual de perda da rentabilidade em investimentos, comparada a região sudeste, para as demais regiões do Brasil com base na figura 9.

Tabela 9. Percentual de perda da rentabilidade em investimentos por região em relação a região Sudeste Brasil.

Região	Percentual de perda da rentabilidade em relação a região Sudeste
Centro-Oeste	-2,42%
Sul	-4,29%
Nordeste	-7,41%
Norte	-11,23%

Fonte: Autor, 2021

A equação (10) apresenta a função matemática para a reta apresentada na figura 9, obtida através da interpolação dos pontos da mesma.

$$y = 50,63x - 37,656 \quad (10)$$

Dessa forma, pode-se determinar de maneira mais precisa o retorno para o investimento relacionado a troca de motores variando-se o fator  $(1+\hat{e})/(1+d)$ .

## 2.6 ANÁLISE CCV NA TROCA POR MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS MAIS EFICIENTES

Nas subseções 2.6.1 a 2.6.4 será apresentado todo embasamento teórico utilizado no estudo de viabilidade da troca de motores trifásicos menos eficientes por motores mais eficientes em plantas industriais levando-se em conta uma possível mudança de potência nominal, devido a baixos carregamentos observados nos motores elétricos nestas condições.

### 2.6.1 Rendimento e Carregamento do Motor de Indução Trifásico (MIT)

A equação (11) mostra o indicador de eficiência do MIT, conforme NBR 5383-1/2001, que trata de máquinas elétricas girantes e especificamente do motor de indução trifásico.

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (11)$$

Onde,  $P_{saída}$  representa a potência entregue no eixo da máquina e  $P_{entrada}$  representa a potência absorvida nos bornes do motor. Conforme Lima *et al* (2020), o rendimento  $\eta$  depende diretamente da corrente do estator, do escorregamento e das perdas suplementares que ocorrem durante o funcionamento do motor.

Assim, ao elaborar as curvas de rendimento do MIT, os fabricantes levam em consideração todas as variáveis citadas anteriormente, permitindo uma previsão segura de operação de tais motores.

A partir da equação (11), pode-se também definir a potência no eixo do MIT, conforme apresentado em (12).

$$P_{eixo} = \eta \cdot P_{entrada} \quad (12)$$

O carregamento ( $L$ ), por sua vez, pode ser representado pela relação entre a potência no eixo  $P_{eixo}$  e a potência nominal  $P_n$ , como apresentado em (13).

$$L = \frac{P_{eixo}}{P_n} \times 100\% \quad (13)$$

É válido ressaltar que assim como rendimento varia com o carregamento, o mesmo também sofre influência da corrente do estator, do escorregamento e das perdas suplementares que ocorrem no MIT. Entretanto, é da relação entre rendimento e carregamento que é obtida as curvas ( $\eta \times L$ ) importante para previsão de operação do MIT e que é apontada por Lima *et al* (2020) como a curva que apresenta uma visão mais ampla e irrestrita da operação dos mesmos,

sendo fundamental no dimensionamento e projeto de ações de eficiência energética envolvendo MIT.

### 2.6.2 Características Básicas da Análise CCV do Motor de Indução Trifásico

O tempo médio de vida útil de motores é estimado com base em seu funcionamento em condições normais, conforme apresentado na tabela 10.

Tabela 10. Tempo médio de vida útil de motores elétricos.

<b>Tempo Médio de Operação de Motores Elétricos</b>				
<b>Vida Útil (Anos)</b>	10	12	15	20
<b>Potência</b>	0,75kW / 1,1 kW 1 CV / 1,5 CV	1,1kW / 11 kW 1,5 CV / 15 CV	11kW / 110 kW 15 CV / 150 CV	110kW /370 kW 150 CV / 500 CV

Fonte: Adaptado de Andrade, 2017.

Como citado anteriormente, a tabela 10 não leva em consideração fatores que diminuem a vida útil do motor. Silva (2008) aponta que efeitos térmicos, mecânicos, elétricos, ambientais e manutenção afetam diretamente a vida útil dos motores.

A equação (14) representa o custo do ciclo de vida de um motor de indução levando-se em conta todos os fatores envolvidos em seu processo de funcionamento, em especial em indústrias eletro intensivas.

$$C_{CV} = C_I + C_E + C_{O\&M} + C_{rep} + C_{res} \quad (14)$$

Onde,  $C_I$  é o investimento inicial, englobando a aquisição e instalação do motor.  $C_E$  é o custo da eletricidade durante o ciclo de vida, ou seja, o quanto de energia esse motor consumiu durante toda sua vida útil.  $C_{O\&M}$  são custos relacionados a manutenção e operação. Em tais custos estão inclusas as manutenções preventivas, como lubrificação e limpeza, e preditivas como análise de temperatura, vibração e etc.  $C_{rep}$  representa custos com reposição de peças e equipamentos, como rotores, carcaça, rolamentos ou qualquer peça do motor que apresente defeito durante sua vida útil e necessite ser repostas. Por fim,  $C_{res}$  são custos residuais relacionados ao descarte após a vida útil do motor.

Entretanto, é válido ressaltar que através da Portaria Interministerial Nº 1 de 29 de junho de 2017, são apresentados, de maneira inédita, índices mínimos de rendimento (MEPS) para motores reconicionados equivalentes ao IR3. Dessa forma, custos relacionados ao descarte poderão ser atenuados ou até mesmo extinguidos a depender do destino que se dará a determinados motores.

Conforme Aguiar (2018), o custo da energia elétrica  $C_E$  consumida pelo Motor de indução trifásico (MIT) é apresentado conforme a equação (15).

$$C_E = \frac{0,736 \cdot P_n \cdot L \cdot T \cdot H}{\eta(L)} \quad (15)$$

$T$  é a tarifa atual da eletricidade em R\$/kWh que varia no tempo.  $L$  representa o carregamento do motor em p.u.  $P_n$  é a carga nominal do motor em cv. O rendimento do mesmo é dado por  $\eta(L)$  que varia em relação ao carregamento.  $H$  é a variável relativa às horas por ano de operação do MIT. O aumento da tarifa durante a vida útil do motor é calculado pela taxa de escalada de energia.

Como apontado por Andrade (2017), todos os custos devem ser referenciados para um instante de tempo definido conforme pensado no fluxo de caixa de determinado empreendimento. Dessa forma as comparações entre custos e benefícios serão feitas sobre a mesma base monetária. Os custos ou benefícios associados a ela são referidos como Valor Presente.

Assim, o valor presente relacionado ao custo de energia elétrica ( $C_E$ ) no fluxo de caixa do ciclo de vida do equipamento é dado através da equação (16):

$$VP_{CE} = C_E \cdot \left( \frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \quad (16)$$

Onde,  $\hat{e}$  representa a taxa de escalada da energia elétrica,  $t$  o tempo do projeto em questão, sendo representado em anos.

De maneira similar, a equação (17) apresenta o valor presente relacionado ao custo inicial  $C_I$  realizado em determinado investimento.

$$VP_{CI} = \frac{C_I}{(1 + d)^t} \quad (17)$$

É válido ressaltar que todos os demais custos despendidos durante a vida útil do MIT, como custos relacionados a operação, manutenção, reposição de peças e custos residuais, não serão levados em consideração no presente estudo e conseqüentemente não serão explicados em detalhes nesta presente seção, uma vez que durante as trocas de motores a serem realizadas, não haverá nenhuma mudança em tecnologia de funcionamento dos MIT, exceto o aumento no

rendimento do novo motor em relação ao antigo. Logo, para efeito de comparação, os demais custos supracitados permanecem os mesmos para ambas opções de motores.

### 2.6.3 Método da Economia Líquida Aplicada ao MIT

O método da economia líquida é considerado um método de medição da relação custo-benefício, ou rentabilidade, entre projetos de eficiência energética (FULLER; PETERSEN, 1995). Ainda de acordo com Fuller e Petersen (1995), com o método de economia líquida é possível avaliar a rentabilidade da troca de motores, uma vez que o mesmo compara o valor presente líquido (*VPL*) ao longo do ciclo de vida das opções de investimento.

Inicialmente, consideramos o motor de baixa eficiência como situação atual, assim suas grandezas serão representadas pelo índice (*br*) enquanto um motor energeticamente mais eficiente será representado pelo índice (*ar*). A equação (18) apresenta o *VPL* relacionado ao custo com energia elétrica para um motor de indução de baixo rendimento:

$$VPL_{Ebr} = \sum_{t=1}^{m_{br}} C_{Ebr} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \quad (18)$$

Com base em (18),  $m_{br}$  é o ciclo de vida do motor de baixo rendimento e  $C_{Ebr}$  o custo com eletricidade. A equação (19) apresenta o *VPL* referente ao custo relacionado ao investimento inicial para um MIT de baixo rendimento.

$$VPL_{Ibr} = \sum_{t=0}^{m'_{br}} \left[ \frac{C_{Ibr}}{(1+d)^t} \right] \quad (19)$$

onde,  $m'_{br}$  quantidade de parcelas investidas no sistema em questão e  $C_{Ibr}$  representa o custo do investimento no referido sistema de baixo rendimento.

A soma das duas equações resulta no valor presente líquido total para um MIT de baixo rendimento, sendo expressa por meio da equação (20).

$$VPL_{br} = \sum_{t=1}^{m_{br}} \left[ C_{Ebr} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] + \sum_{t=0}^{m'_{br}} \left[ \frac{C_{Ibr}}{(1+d)^t} \right] \quad (20)$$

De maneira análoga ao apresentado na equação (20), as equações (21), (22) e (23) expressam agora para o MIT mais eficiente, o valor presente líquido relacionado ao custo com

energia elétrica, o *VPL* relacionado ao custo de investimento inicial e *VPL* total para o MIT, respectivamente.

$$VP_{Ear} = \sum_{t=1}^{m_{ar}} C_{Ear} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \quad (21)$$

$$VP_{Iar} = \sum_{t=0}^{m'_{ar}} \frac{C_{Iar}}{(1+d)^t} \quad (22)$$

$$VPL_{ar} = \sum_{t=1}^{m_{ar}} \left[ C_{Ear} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] + \sum_{t=0}^{m'_{ar}} \left[ \frac{C_{Iar}}{(1+d)^t} \right] \quad (23)$$

onde,  $m_{ar}$  é o ciclo de vida do motor de alto rendimento,  $m'_{ar}$  quantidade de parcelas investidas no sistema em questão,  $C_{Ear}$  o custo com eletricidade e  $C_{Iar}$  representa o custo do investimento no referido sistema de alto rendimento

O *Net Savings* (NS), conhecido como economia líquida (NS) é representado pela diferença entre o  $VPL_{br}$  e  $VPL_{ar}$ . Fazendo o desenvolvimento matemático entre as equações (18) a (23), temos:

$$VPL_{ar} = VP_{Ear} + VP_{Iar} \quad (24)$$

$$VPL_{br} = VP_{Ebr} + VP_{Ibr} \quad (25)$$

Subtraindo (24) e (25), tem-se:

$$VPL_{ar} - VPL_{br} = VP_{Ear} + VP_{Iar} - VP_{Ebr} - VP_{Ibr} \quad (26)$$

Fazendo as devidas manipulações, obtém-se

$$VPL_{ar} - VPL_{br} = (VP_{Ear} - VP_{Ebr}) + (VP_{Iar} - VP_{Ibr}) \quad (27)$$

Multiplicando (27) por (-1), temos:

$$VPL_{br} - VPL_{ar} = (VP_{Ebr} - VP_{Ear}) - (VP_{Iar} - VP_{Ibr}) \quad (28)$$

Rearranjando os termos de (28):

$$VPL_{br} - VPL_{ar} = (VP_{Ebr} + VP_{Ibr}) - VP_{Iar} - VP_{Ear} \quad (29)$$

Assim, encontra-se a expressão que representa o *Net Savings (NS)* conforme mostrado pela equação (30).

$$NS = VPL_{br} - VPL_{ar} \quad (30)$$

Ampliando (30) com todos os termos, temos:

$$NS = \sum_{t=1}^{m_{br}} \left[ C_{Ebr} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] + \sum_{t=0}^{m'_{br}} \left[ \frac{C_{Ibr}}{(1+d)^t} \right] - \sum_{t=1}^{m_{ar}} \left[ C_{Ear} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] + \sum_{t=0}^{m'_{ar}} \left[ \frac{C_{Iar}}{(1+d)^t} \right] \quad (31)$$

Assim, para valores de *NS* maior que 0 o investimento é considerado viável (ANDRADE, 2017). Entretanto, no caso específico da troca de motores, algumas considerações serão feitas. Inicialmente, iremos considerar que os investimentos serão realizados antes da operação, ou seja,  $t=0$ , dessa forma a equação (31) se reduz a seguinte expressão:

$$NS = \sum_{t=1}^{m_{br}} \left[ C_{Ebr} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] - \sum_{t=1}^{m_{ar}} \left[ C_{Ear} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] - (C_{Iar} - C_{Ibr}) \quad (32)$$

Outro ponto pertinente no estudo de viabilidade de troca de motores que deve ser levado em consideração, diz respeito ao ciclo de vida dos MIT envolvidos nos processos de troca. Caso a opção de baixo rendimento (situação atual) e alto rendimento (motor substituto) tenham o mesmo tempo de ciclo de vida, ou seja,  $m_{br} = m_{ar}$ , o *Net Savings (NS)* apresentando em (32) poderá ser reescrito conforme apresentado na equação (33):

$$NS = \sum_{t=1}^m \left[ (C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] - (C_{Iar} - C_{Ibr}) \quad (33)$$

Para estudos de viabilidade de troca de motores que apresentem entre suas amostras motores de baixo rendimento (situação atual) com carregamento muito baixo, poderá ser considerada a opção de troca por um motor de alto rendimento de menor potência nominal.

Dessa forma, a potência nominal pode implicar diretamente no ciclo de vida do motor de alto rendimento, fazendo com que o mesmo tenha um ciclo de vida diferente do motor de menor rendimento (LIMA *et al.* 2020). Assim, para tempos de ciclos de vida diferentes o *Net Savings* pode ser calculado conforme apresentado pela equação (31).

#### 2.6.4 Cálculo da Energia Economizada

Outro índice importante no estudo de rentabilidade em projetos de eficiência energética é a energia economizada (SE), ou conhecido como *Energy Saved Cost*. O indicador em questão é obtido através da razão entre a diferença dos investimentos de alto e baixo rendimento ( $\Delta I$ ) e a economia financeira de energia elétrica gerada no projeto ( $\Delta E$ ). Conforme Andrade (2017), ao relacionar investimentos, em valores monetários, com a energia economizada, em MWh é estabelecido um parâmetro para projetos de eficiência energética que permite a comparação com outros tipos de investimentos relacionados à energia. O custo da energia economizada pode ser calculado conforme a equação (34) e sua unidade é expressa e em (US\$/MWh).

$$SE = \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{C_{Iar} - C_{Ibr}}{(C_{Ebr} - C_{Ear}) \sum_{t=1}^m \left( \frac{1 + \hat{e}}{1 + \bar{d}} \right)^t} \quad (34)$$

### 3 TROCA DE MOTORES LEVANDO EM CONTA O CARREGAMENTO

Na presente seção é apresentado todo embasamento teórico referente a realização da troca de motores levando-se em conta o carregamento. Para tanto, será abordado a evolução da normatização dos rendimentos do motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo (MITGRE) e, de maneira subsequente, serão abordados os processos de troca de motores sem e com mudança de carregamento, conseqüentemente, mudança na potência nominal do novo motor.

Por fim, serão apresentados os custos de aquisição de motores IR2 e IR3, bem como a apresentação do estudo de caso introdutório referente à troca de motores em uma indústria com média população de motores em seu parque fabril e considerando que esta empresa tenha unidades industriais em regiões distintas do Brasil.

#### 3.1 EVOLUÇÃO DOS ÍNDICES DE RENDIMENTO NO BRASIL

Nos últimos 30 anos, países começaram a implementar selos e determinar o rendimento mínimo permitido para motores elétricos do tipo indução com rotor gaiola de esquilo. A ideia de aplicar índices mínimos de rendimento (IR, no Brasil), ou *Minimum Efficiency Performance Standards* (MEPS), em motores elétricos tem o objetivo de identificar visualmente, para os compradores, os motores que possuem rendimento superior (SOUZA, 2018).

O primeiro país a introduzir regulamentação para motores elétricos foram os EUA, tendo sua regulamentação aprovada em 1992, porém tornando-se obrigatória apenas em 1997 para os MITRGE comercializados no país. A primeira legislação para o rendimento de MITRGE ficou conhecida como EAct-92 e é comparável à definição internacional IE2 da IEC (SOUZA, 2018). No ano de 2007 foi publicada a legislação de MEPS equivalente ao IE3 (utilizados na Europa) para os EUA e o Canadá, passando a entrar em vigor em 2010. Atualmente, muitos países já possuem regulamentações para rendimento de motores elétricos

No Brasil, as primeiras deliberações a respeito da etiquetagem de equipamentos elétricos resultam na criação do selo PROCEL, no ano de 1993 (ANDRADE, 2017). Entretanto, é dentre as regulamentações da Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que ocorre a implementação da etiquetagem obrigatória no Brasil e a determinação de índices máximos e mínimos de eficiência para equipamentos (BRASIL, 2001). O primeiro equipamento a ser regulamentado foi o motor elétrico trifásico, através do Decreto 4.508, de 11 de dezembro 2002 (BRASIL, 2002). Além disso, o decreto em questão criou duas categorias de motores separadas pelo rendimento: os motores *standard* e os motores “alto rendimento” com rendimento superior.

Os motores *standard* equivalem à categoria IE1 e os motores “alto rendimento” equivalem internacionalmente à categoria IE2 (SOUZA, 2018). Através da Portaria nº 553 de 8 de dezembro de 2005, é estabelecido que os motores elétricos que não atenderem o nível mínimo conhecido no Decreto nº 4.058/2002 como motor de alto rendimento, não poderão mais ser comercializados no território brasileiro a partir de 2009 (MME, 2005). No dia 08 de dezembro de 2010, o INMETRO publicou a Portaria nº 488, onde são apresentados os requisitos obrigatórios para a avaliação de conformidade dos motores elétricos de indução trifásicos, padronizando assim a metodologia nacional de avaliação de rendimento (INMETRO, 2010).

O último documento publicado para o rendimento de MITRGE foi Portaria Interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017, que estabelece o nível de rendimento mínimo para MITRGE comercializados para classificação equivalente a IE3. Logo, o Brasil passa por uma transição onde o MITRGE assume agora as classes IR2 (Índice de rendimento 2, equivalente ao alto rendimento) e o IR3 (Índice de rendimento 3), conforme apontado por Aguiar (2018).

Apesar do avanço em busca do aumento da eficiência de motores, Sauer *et al.* (2015) aponta que, mesmo muitos anos após a implantação do Decreto 4.508/2002 e da Portaria 553/2005, os MITRGE comercializados no Brasil ainda estavam com rendimento significativamente abaixo do mínimo permitido.

### 3.2 TROCA DE MOTORES SEM A MUDANÇA DE CARREGAMENTO

Os motores elétricos podem ser trocados obedecendo certos parâmetros específicos que vão de encontro à sua justificativa de troca. Uma das formas mais comuns é a troca direta de motores. Nela, os motores de rendimento inferior são substituídos por motores de maior rendimento, mantendo-se a potência nominal, um carregamento aproximadamente igual ao anterior (devido as mudanças nas curvas “rendimento *versus* carregamento” de cada IR) e, mesma tecnologia de funcionamento. Em países como o Brasil, a realização da troca de motores direta ainda é feita de forma usual, uma vez que ainda existem motores com índices bem inferiores ao IR2 em pleno funcionamento nos parques industriais nacionais.

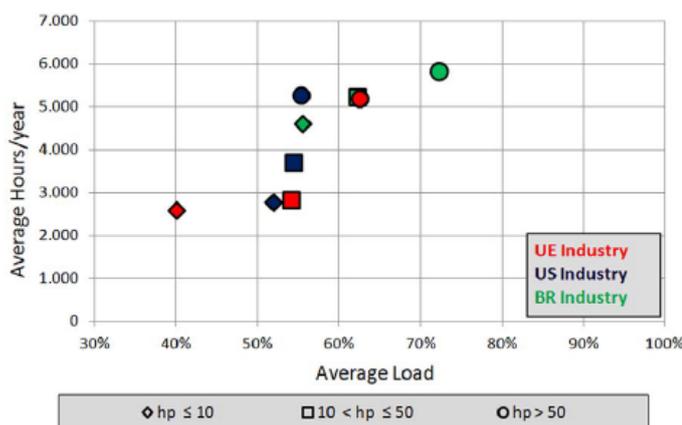
Como já abordado na seção 1, o presente estudo irá realizar a troca de motores de índice IR2 por motores de índice IR3 em uma planta industrial. É de conhecimento que trocas desse tipo levam em consideração não somente os rendimentos, mas consequentemente os carregamentos dos mesmos, uma vez que motores com índices de rendimento superiores apresentam rendimentos melhores para carregamentos parciais em relação a motores de índice

IR2. Para tanto, faz-se necessário a determinação dos carregamentos para motores de potência nominal inferior ao dos motores originais, o que será apresentado na subseção 3.2.1

### 3.2.1 Determinação dos Carregamentos da população de MIT com Base na Faixa de Potência

Como o estudo irá abordar parques industriais em diferentes locais do Brasil, faz-se necessário que os dados referentes aos carregamentos dos mesmos fossem determinados de maneira randômica com base nas faixas de carregamentos médios por potência conforme apresentado por Andrade e Pontes (2017). A figura 10 apresenta os valores de carregamento para os polos industriais do Brasil, união europeia e estados unidos para faixa de potência de 1 a 50hp em relação hora/ano de funcionamento.

Figura 10. Carregamento médio por hora/ano de funcionamento para os polos da Europa, EUA e Brasil.



Fonte: Andrade e Pontes (2017).

Por sua vez, tabela 11 apresenta os carregamentos médios para motores de indução trifásicos no Brasil.

Tabela 11. Carregamentos médios para motores de indução trifásicos no Brasil.

Faixa de Potência	Carregamento Médio	Potência Média (hp)	Operação Horas/Ano
$1 \leq hp \leq 10$	62	2,7	4594
$10 \leq hp \leq 40$	64	20,7	5228
$40 \leq hp \leq 100$	73	52,5	6175
$100 \leq hp \leq 300$	74	119,7	5805

Fonte: Adaptado de Andrade e Pontes (2017).

Com base na figura 10 e na tabela 11, foram determinadas as faixas contendo os valores mínimos e máximos dos carregamentos médios a serem utilizados no presente trabalho,

independentemente do tipo de indústria. A tabela 12 ilustra os valores a serem considerados. Os valores mínimos considerados são as médias mínimas apresentadas na figura 10. Os valores máximos serão considerados os carregamentos médios da tabela 9.

Tabela 12. Faixa de Carregamentos Médios por Potência

Faixa de Potência	Faixa de Carregamento	Valor Médio
$P \leq 10\text{cv}$	40 - 62%	51%
$10\text{cv} \leq P \leq 40\text{cv}$	54 - 64%	59%
$P \geq 50\text{cv}$	54 - 73%	63,5%

Fonte: Autor (2021)

Com os valores médios dos carregamentos por faixa de potência, faz-se possível gerar randomicamente carregamentos para uma população específica de motores ao qual se deseja estudar.

### 3.3 TROCA DE MOTORES COM MUDANÇA DE CARREGAMENTO

Diferente da troca por índice de rendimento, onde os motores de rendimento inferior são substituídos por motores de maior rendimento sendo mantida a potência dos mesmos, na troca de motores com mudança de carregamento trabalha-se com a possibilidade do aumento no valor do carregamento médio do novo motor em conjunto com a redução da potência nominal do novo motor. Ou seja, um determinado motor IR2 pode ser substituído por um motor índice IR3 de potência inferior, porém com maior carregamento e, assim, ter mais viabilidade econômica.

Estudos como o Lima *et al.* (2020) ilustram de maneira prática a situação citada acima. A tabela 13 apresenta a troca de um motor IR2 de 50cv realizada no estudo de Lima *et al.* (2020). O estudo foi realizado tomando-se como base uma planta industrial salineira real. Onde,  $P_n$  é a potência nominal do motor,  $L$  o carregamento,  $\eta$  o rendimento do motor e  $C_E$  o custo de energia elétrica e  $H$  o número de horas trabalhadas por ano.

Tabela 13. Opções de Troca de Motor IR2 - 50cv com base no Custo de Energia para as regiões Sudeste e Nordeste do Brasil.

MIT 50 cv – 4 pólos – IR2					
Opções de Troca	$P_n$ (cv)	$L$ (p.u.)	$\eta$ (%)	$C_E$ Sudeste (R\$/ano)	$C_E$ Nordeste (R\$/ano)
1	25	0,849	92,9	35.957,63	31.554,65
2	40	0,531	92,7	36.035,21	31.622,73
3	30	0,707	92,6	36.069,73	31.653,03
4	50	0,424	92,4	36.152,21	31.725,40

Fonte: Adaptado de o Lima *et al.* (2020)

Com base na tabela 13, são apresentadas quatro opções de troca (todas IR3) para um MIT IR2 com potência de 50cv – 4 pólos. Observa-se que a opção que apresenta o menor custo de energia ( $C_E$ ) tanto para a região Sudeste como para região Nordeste é a opção 1. A mesma apresenta um MIT IR3 com 25cv de potência e com carregamento de aproximadamente 85%. A opção 4, por sua vez, representa a opção de troca para um MIT IR3 de mesma potência e carregamento do MIT IR2 detendo o pior custo em energia dentre todas as opções.

Dessa forma, é imprescindível que estudos relativos a troca de motores levem em consideração a mudança de carregamento como parâmetro nas trocas. Entretanto, não existe um consenso específico para um limite máximo de aumento do carregamento no dimensionamento do novo motor. A equação (35) apresenta um exemplo da expressão para o dimensionamento de motores com base na carga.

$$Pot_{Motor\_Novo} = Pot_{Motor\_Antigo} \cdot (0,75-0,9) \quad (35)$$

Onde,  $Pot_{Motor\_Novo}$  e  $Pot_{Motor\_Antigo}$  representam respectivamente a potência dimensionada do motor novo e potência do motor antigo, variando entre uma carga de 75 a 90% (USDE, 2014).

### 3.4 VALORES FINANCEIROS DO MOTOR IR2 E IR3

Com a Portaria Interministerial nº 1 estabelecendo o fim da fabricação, venda e importação de motores IR2, o acesso aos preços de tais motores se tornou uma informação de difícil acesso. Dessa forma, a precificação dos mesmos se baseia na prospecção de valores já tabelados e corrigidos pela inflação acumulada do período. A tabela 14 apresenta os preços para MIT de índices IR2 4 polos em dólar.

Tabela 14. Preços em Dólar (\$) para MIT de índices IR2 4 polos em março de 2016.

Potência (CV)	Valor em Dólar (\$) (03/2016)
1,5	\$244,18
2	\$297,57
3	\$344,00
4	\$438,33
5	\$463,34
6	\$639,17
7,5	\$677,52
10	\$809,83
12,5	\$912,64
15	\$974,01
20	\$1.380,05
25	\$1.604,29
30	\$2.283,18
40	\$3.052,09
50	\$3.383,74

Fonte: Adaptado de Andrade e Pontes (2017).

Com base nos valores apresentados na tabela 14, fez-se possível o cálculo dos valores referente a março de 2016 em dólar (\$) para real (R\$) com base na cotação dólar/real média do mês de março de 2016. Para tanto, foi utilizada a cotação de R\$ 3,70.

De maneira subsequente, foi feita a atualização monetária dos valores em real para o mês de abril de 2021. A equação (36) apresenta a expressão utilizada para atualização dos preços de MIT IR2 para abril de 2021.

$$\text{Preço(R \$)}_{\text{Motor\_Abril\_2021}} = \frac{\text{Número - índice}_{\text{Abril\_2021}}}{\text{Número - índice}_{\text{Março\_2016}}} \times \text{Preço(R \$)}_{\text{Motor\_Março\_2021}} \quad (36)$$

Onde,  $\text{Número - índice}_{\text{Abril\_2021}}$  e  $\text{Número - índice}_{\text{Março\_2016}}$  são respectivamente o número-índice de inflação referente aos meses de abril de 2021 e março 2016. Já  $\text{Preço(R\$)}_{\text{Motor\_Março\_2021}}$  é o preço do motor em R\$ calculado para o motor IR2 referente ao mês de março de 2016. Os números índices podem ser consultados no sítio eletrônico do SIDRA/IBGE. Para os meses em questão, foram utilizados os índices de 4.610,92 e 5.692,31 para os meses de março de 2016 e abril de 2021 respectivamente.

Dessa forma, fez-se possível a atualização dos valores para a data em questão. A tabela 15 apresenta os valores de motores IR2 4 polos em Real para o mês de março de 2016, bem como os valores dos mesmos atualizados para abril de 2021.

Tabela 15. Preços referentes a abril de 2021 - MIT IR2 IV Polos.

<b>Preço IR2 - IV Polos</b>		
<b>Potência</b>	<b>Preço em Real (R\$) (03/2016)</b>	<b>Preço em Real (R\$) (04/2021)</b>
1	R\$ 807,64	R\$ 1.001,34
1,5	R\$ 903,47	R\$ 1.120,15
2	R\$ 1.101,01	R\$ 1.365,07
3	R\$ 1.272,80	R\$ 1.578,06
4	R\$ 1.621,82	R\$ 2.010,79
5	R\$ 1.714,36	R\$ 2.125,52
6	R\$ 2.364,93	R\$ 2.932,12
7,5	R\$ 2.506,82	R\$ 3.108,05
10	R\$ 2.996,37	R\$ 3.715,00
12,5	R\$ 3.376,77	R\$ 4.186,63
15	R\$ 3.603,84	R\$ 4.468,16
20	R\$ 5.106,19	R\$ 6.330,82
25	R\$ 5.935,87	R\$ 7.359,50
30	R\$ 8.447,77	R\$ 10.473,83
40	R\$ 11.292,73	R\$ 14.001,12
50	R\$ 12.519,84	R\$ 15.522,53

Fonte: Autor, 2021.

Os motores IR3, por sua vez, estão presentes no mercado normalmente. Logo, não há dificuldades para encontrar seus preços. A tabela 16 apresenta os valores em reais dos motores IR3 retirados do sítio eletrônico da fabricante WEG. Os motores são da categoria IR3 W22.

Tabela 16. Preços MIT IR3 - IV Polos

<b>Preço IR3 W22 - IV Polos</b>		
<b>Potência (CV)</b>	<b>Preço em Real (R\$) (04/2021)</b>	
1	R\$	1.244,53
1,5	R\$	1.385,15
2	R\$	1.745,95
3	R\$	2.008,28
4	R\$	2.489,42
5	R\$	2.668,01
6	R\$	3.509,76
7,5	R\$	3.714,70
10	R\$	4.642,90
12,5	R\$	5.215,72
15	R\$	5.557,65
20	R\$	8.041,94
25	R\$	9.321,29
30	R\$	12.957,82
40	R\$	16.364,69
50	R\$	18.109,14

Fonte: Adaptado de WEG (2021)

### 3.5 ESTUDO DE CASO: EMPRESA INDUSTRIAL COM DOIS PARQUES FABRIS EM REGIÕES DISTINTAS DO BRASIL

Na subseção 3.5.1 será abordado todo embasamento experimental para realização do estudo de caso em questão. Por conseguinte, a subseção 3.5.2 abordará o de maneira concisa estudo de caso que será realizado no presente trabalho.

#### 3.5.1 Troca de Motores em Indústria Salineira de Médio Porte

A presente seção irá abordar os estudos realizados por Lima *et al.* (2020) e Junior *et al.* (2021). Ambos os estudos são apresentados com intuito de comprovar a eficácia do método e das informações apresentadas nas seções anteriores e em estudos relacionados à troca de motores industriais menos eficientes por motores mais eficientes.

O estudo realizado por Lima *et al.* (2020) tem o intuito de realizar a troca de motores em uma unidade fabril de médio porte com base na taxa de escalada nacional da energia elétrica. Por sua vez, o estudo realizado por Junior *et al.* (2021) tem a mesma finalidade, mas considerando uma empresa industrial com duas filiais em regiões diferentes: Nordeste e Sudeste.

Os dois estudos utilizaram a mesma planta industrial, uma indústria salineira de médio porte. A empresa conta com 62 motores trifásicos em potências que variam de 3 a 50 cv. Os motores presentes no local possuem mais de 10 anos em funcionamento e com programas ativos de manutenção corretiva e preventiva. A tabela 17 apresenta o quantitativo de motores na indústria.

Tabela 17. Quantitativo de MIT – Indústria.

Quantitativo de MITRGE - Indústria Eletrointensiva	
Potência (CV)	Quantidade
3	20
4	6
5	22
7,5	8
30	2
40	2
50	2
<b>Total</b>	<b>62</b>

Fonte: Adaptado de Lima *et al.* (2020)

Ambos os estudos de troca de motores foram aplicados apenas nos motores de maior potência da indústria em questão, sendo eles: 2 motores de 30 cv, 2 motores de 40cv e 2 motores

de 50cv. Conforme Lima *et al.* (2020), os motores de maior potência impactam no maior processamento de energia elétrica por equipamento individual, e leva-se em conta a importância dentro do processo fabril. Os demais motores apresentam potência inferior a 10cv, como apresentado na tabela 17.

Como informado na subseção, os motores da indústria em estudo foram adquiridos há mais de 10 anos. Em posse dessa informação, os autores consideraram no estudo que os motores presentes na indústria em questão serão da classe IR2. Dessa forma, os motores IR2 foram substituídos por motores de potência semelhante ou inferior com índices IR3.

Os dados referentes a carregamento e rendimento dos motores estudados foram coletados no sítio eletrônico de uma fabricante de motores. Em relação a análise econômica, os autores levaram em consideração: horas de operação dos motores por ano, tarifa média e taxa de escalda da energia elétrica. A quantidade de horas trabalhadas no ano por cada motor é de 4368 horas. Esse valor foi obtido a partir da consideração de 84 horas por semana considerando 52 semanas trabalhadas, conforme apontado por Lima *et al.* (2020).

O preço médio do kWh e a taxa de escalada considerada por Lima *et al.* (2020) foi de 0,40 R\$/kWh e 3,08% respectivamente. Para Junior *et al.* (2021), foi considerada uma tarifa de 0,49 R\$/kWh para região Sudeste do Brasil e 0,43 R\$/KWh para região Nordeste e uma taxa de escalada de 3,69 e 2,84%, respectivamente.

Ambos os estudos concluíram que a análise do CCV na troca de motores é fortemente influenciada pelo valor da taxa de escalada de energia elétrica, mostrando que apesar do maior custo da energia elétrica em determinadas regiões do país (no caso Brasil), a rentabilidade é latente com uma maior economia líquida, independente da opção de motor a ser comprado para a troca. Outra conclusão pertinente, é que a troca por um motor de menor potência e maior carregamento nem sempre é viável, mas uma alternativa considerável, variando conforme a situação e necessitando de uma análise mais especializada.

### **3.5.2 Estudo de Caso proposto: Troca de Motores em Indústria de médio porte com unidades Fabris em regiões distintas do Brasil**

Com base no estudo de caso apresentado na subseção 3.5.1, é proposto no presente trabalho uma expansão da análise realizada na troca de motores em uma indústria de médio porte com dois parques fabris em regiões distintas do Brasil.

O presente estudo fará uso da mesma planta industrial utilizada nos estudos de Lima *et al.* (2020) e Junior *et al.* (2021). Entretanto, a análise será aplicada para todos os motores, conforme apresentado na tabela 17 do quantitativo de motores da indústria em questão

### 3.5.2.1 Determinação dos Carregamentos da população de MIT

Devido ao número elevado de motores, os dados referentes aos carregamentos dos mesmos foram determinados de maneira randômica com base nas faixas de carregamentos médios por potência conforme apresentado na tabela 12, presente na seção 3.2.1. Os dados foram gerados com auxílio do software de simulação e os comandos utilizados são apresentados na seção 4 do presente trabalho.

### 3.5.2.2 Determinação dos Rendimentos da população de MIT

Os rendimentos da população de MITRGE a serem utilizados no estudo foram determinados com base nos dados coletados no sítio eletrônico da fabricante de motores WEG. As referências utilizadas para consulta no site foram W22, IR2 e IR3, Potências de 1 cv a 50 cv, 4 polos, 60Hz, 380 V. A tabela 18 apresenta os valores de rendimento para motores IR2 e IR3 com base nos carregamentos.

Tabela 18. Rendimentos de Motores IR2 e IR3 com em função do Carregamento.

Potência (CV)	Carregamento - IR2			Carregamento IR3		
	50%	75%	100%	50%	75%	100%
1	77,5	80	80,5	82,3	83	83
1,5	78	81	81,6	79,5	82,5	84
2	81	83,5	84,2	84	86	86,5
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
6	88	88,5	88,5	88,7	89,5	89,5
7,5	88,4	89,1	90	89,7	90,3	91
10	90	90,8	91	90,8	91,6	91,7
12,5	90	90,8	91	91,8	92,4	92,4
15	90,5	91,2	91,7	90,6	91,5	92,4
20	91	92	92	91,6	92,7	93
25	91,8	92	92,4	92,4	93,6	93,6
30	92,5	92,8	93	93	93,5	93,6
40	92,7	93,2	93,4	93,6	94	94,1
50	93	93,2	93,6	94	94,4	94,6

Fonte: Adaptado de WEG, 2021.

### 3.5.2.3 Dados para Análise Econômica

Para análise econômica serão utilizados os valores de horas de operação dos motores por ano e tarifa média por hora. Como a planta será a mesma que a utilizada nos estudos de Lima *et al.* (2020) e Junior *et al.* (2021), a quantidade de horas trabalhados por cada motor será semelhante a utilizada nesses estudos, que é de 4368 horas. A tabela 19 apresenta o preço médio

do kWh que será considerado por região do país, bem como as respectivas taxas de escalada por região, que já foram apresentadas na seção 2 do presente trabalho.

Tabela 19. Taxa de Escalada e preço do kWh médio por região para classe de consumo industrial.

<b>Classe de Consumo Industrial</b>		
<b>Região</b>	<b>Taxa de Escalada (%)</b>	<b>Tarifa Média (R\$ / kWh)</b>
Sudeste	3,35	0,49116
Centro-Oeste	3,17	0,51147
Sul	2,54	0,46703
Nordeste	2,35	0,45608
Norte	1,37	0,51048

Fonte: Autor, 2021.

#### 3.5.2.4 Programação computacional para simular a troca do MIT

Levando-se em conta todas as informações apresentadas nas subseções anteriores será elaborado uma rotina computacional utilizando software de simulação com intuito de automatizar o cálculo dos parâmetros para da troca de motores IR2 por motores IR3. Todo o desenvolvimento do script será apresentado no capítulo 4 do presente trabalho.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tratou de maneira clara e sucinta o histórico da regulamentação dos índices de rendimento. Entretanto, sua principal contribuição para o presente trabalho foi apresentar as condições teóricas e práticas da troca de motores levando-se em conta o carregamento, contemplando todos os parâmetros envolvidos nessa troca. Por fim, foi estabelecido como se dará o estudo de caso objeto desde trabalho. O capítulo seguinte abordará os conceitos básicos do simulador utilizado para realização do estudo da viabilidade técnica e econômica na troca de motores em operação por motores novos, IR3, com possibilidade de mudança no carregamento e na potência nominal do novo motor.

## 4 SIMULAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA TROCA DE MOTORES

A presente seção apresentará todas as informações à cerca do simulador utilizado para realização do estudo da viabilidade técnica e econômica na troca de motores em operação por motores novos, IR3, com possibilidade de mudança no carregamento e na potência nominal do

novo motor, bem como todas as funções nele inseridas, de maneira clara e objetiva.

A fim de facilitar o entendimento, o simulador será apresentado em forma de fluxograma. Entretanto, o código original é apresentado no apêndice B do presente trabalho em pseudocódigo Portugol. Contudo, em funções e expressões específicas de alta complexidade que são inerentes ao *software* simulador utilizado, optou-se por manter o código original tais expressões e funções específicas.

#### 4.1 ESPECIFICAÇÕES DO SIMULADOR

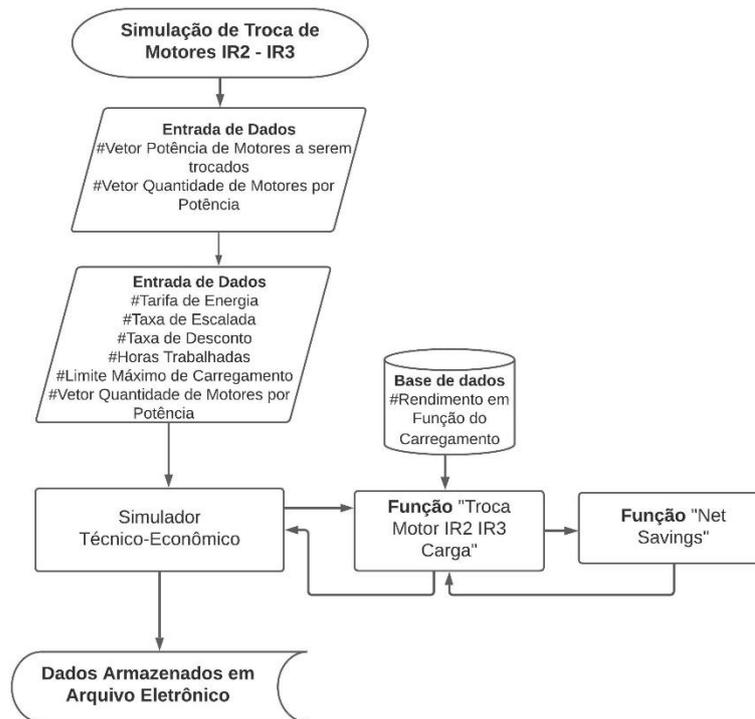
Levando-se em conta todas as informações apresentadas na seção 3 do presente trabalho, foi elaborado um código de programação utilizando software específico de simulação com intuito de automatizar o cálculo dos parâmetros para da troca de motores IR2 por motores IR3. O simulador foi escrito com base na demanda da unidade fabril apresentada por Lima *et al.* (2020), que apresenta 62 motores com potências que variam entre 3 e 50cv – 4 polos.

#### 4.2 SIMULADOR TÉCNICO E ECONÔMICO DAS TROCAS DE MOTORES

Em linhas gerais, o simulador técnico e econômico é o conjunto de códigos do simulador responsável por receber as variáveis de entrada necessárias para a simulação, inicializar as principais funções do simulador, tratar os dados simulados pelas funções e salvar os mesmos em planilha eletrônica. A figura 11 apresenta o fluxograma resumido do simulador técnico e econômico para troca de motores de IR2 por motores IR3.

Com base na figura 11, as entradas do simulador são divididas em duas etapas. A primeira etapa apresenta duas entradas relativas aos dados da população de motores da unidade fabril. Na primeira será apresentada, em forma de vetor, a potência nominal de todos os motores da unidade fabril ao qual se deseja realizar a troca. Por sua vez, a segunda entrada também em forma de vetor e representa a quantidade de motores por potência a serem trocados.

Figura 11. Fluxograma do Simulador Troca de Motores IR2 - IR3.



Fonte: Autor, 2021.

Na segunda etapa entra-se com os dados relativos as especificações econômicas da troca de motores e considerações específicas da simulação. Dessa forma, deverão ser informados o preço médio do kWh ou chamado de tarifa de energia elétrica (em R\$/kWh), a taxa de desconto (d) utilizada, a taxa da escalada (ê) e a quantidade de horas/ano trabalhadas para os motores da unidade fabril. Outro dado de suma importância para a simulação é o valor do limite máximo do novo carregamento. É com base nesse valor máximo de carregamento estabelecido que seja referência para as trocas por motores de potência inferior. Por fim, deverá ser informada a quantidade de repetições da simulação em questão, ou seja, quantas simulações serão realizadas até considerarmos os resultados satisfatórios.

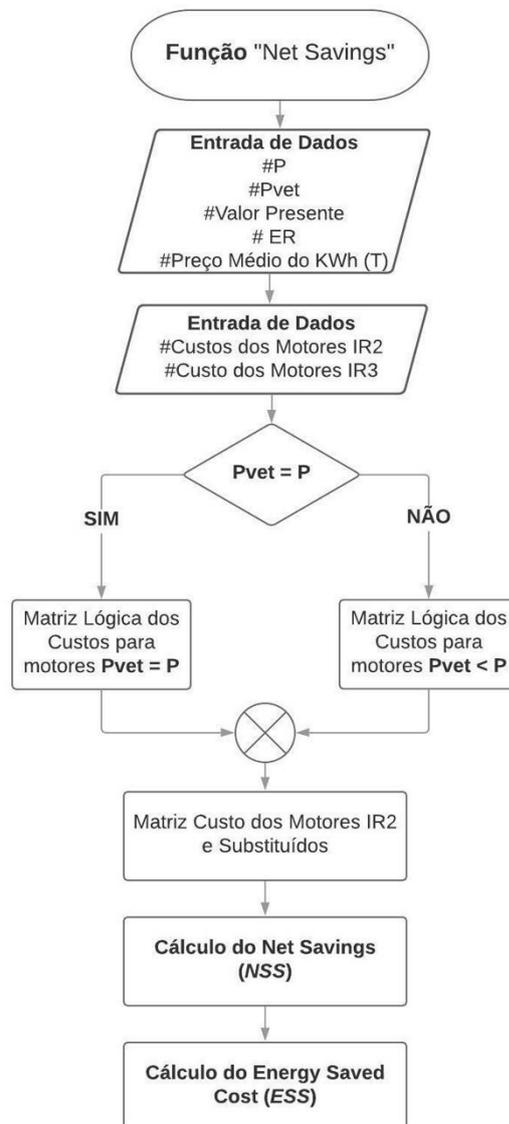
Todas as entradas anteriormente citadas irão alimentar as duas funções principais do simulador, a função “Troca motor IR2 IR3 carga” e a função “Net Savings”. Com base em ambas as funções, será possível atestar a viabilidade econômica e calcular todos os parâmetros necessários para realização da troca de motores e realizar a troca propriamente dita. Após a execução das funções, todos os dados resultantes da mesma serão compilados, processados e salvos em arquivos eletrônicos.

A funções “*Net Savings*”, “*Troca motor IR2 IR3 carga*” serão apresentados de maneira mais específica nas subseções 4.3 e 4.4 da presente seção.

### 4.3 FUNÇÃO “*NET SAVINGS*”

A função “*Net Savings*” é responsável por atestar a viabilidade da trocar de motores com base no valor presente e nos custos dos motores de alto e baixo rendimento. Além disso, na função também é calculada a energia economizada, também conhecida como *Energy Savings*. Todo embasamento teórico utilizado na presente função foi apresentado nas subseções 2.5.3 e 2.5.4 deste trabalho. A figura 12 ilustra fluxograma da função “*Net Savings*”.

Figura 12. Fluxograma da Função "*Net Savings*"



Fonte: Autor, 2021.

Conforme o fluxograma, dentre as entradas utilizadas na função tem-se: a potência ( $P$ ) dos motores ao qual se deseja realizar a troca, o vetor potência dos motores que foram substituídos ( $P_{vet}$ ), o valor presente previamente calculado no simulador ( $VP$ ), a melhora no consumo de energia após a realização da troca ( $ER$ ) e o preço médio do kWh ( $T$ ).

De maneira subsequente, foram inseridos os custos relativos à aquisição dos motores de baixo e alto rendimento (IR2 e IR3). Os custos são apresentados em reais (R\$) e tiverem seus valores previamente calculados conforme apresentado na subseção 3.4. Após a entrada das variáveis, inicia-se a função propriamente dita.

A estrutura condicional apresentada no fluxograma da figura 12 têm o intuito de determinar o custo dos motores de alto e baixo rendimento para determinada potência. Por exemplo, caso a potência do motor a ser substituído seja de 50cv, será atribuído o valor do custo de aquisição referente ao motor IR2 de 50cv previamente declarado no início da função. Por conseguinte, será calculada a matriz custo dos motores a serem trocados, podendo ser o custo IR3 do motor de 50cv ou custo do motor IR3 de potência imediatamente inferior, que no caso é de 40cv. Dessa forma, são encontradas as matrizes custo dos motores IR2 e dos motores substituídos. foram desenvolvidas no simulador estruturas condicionais semelhantes para as demais potências variando entre 50 e 1cv, com base nos valores comerciais encontrados no mercado.

Por fim, com os valores dos custos para os motores de baixo e alto rendimento e do Valor Presente Líquido (Entrada da função “*Net Savings*”) é calculado o valor do *Net Savings* para as trocas de motores rentáveis. O cálculo é feito com base na equação (33), previamente apresenta na subseção 2.5.3.

$$NS = \sum_{t=1}^m \left[ (C_{Ebr} - C_{Ear}) \cdot \left( \frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t \right] - (C_{Iar} - C_{Ibr}) \quad (33)$$

O Cálculo específico do Valor Presente Líquido será apresentado da subseção 4.4 da presente seção.

Por conseguinte, é calculado *Energy Saved Cost*. Assim como o *Net Savings*, o cálculo da energia economizada é feito com base em uma equação previamente apresentada na subseção 2.5.4, conforme mostrado por (34).

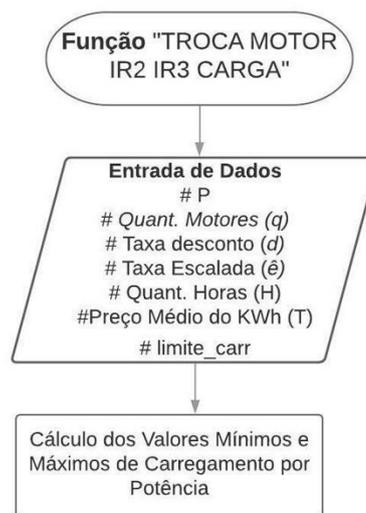
$$SE = \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{C_{Iar} - C_{Ibr}}{(C_{Ebr} - C_{Ear}) \sum_{t=1}^m \left( \frac{1 + \hat{e}}{1 + d} \right)^t} \quad (34)$$

Em (34) o denominador representa a variável de entrada *ER*. O cálculo da mesma será apresentado na subseção 4.4 da presente seção.

#### 4.4 FUNÇÃO “TROCA MOTOR IR2 IR3 CARGA”

A função “Troca Motor IR2 IR3 carga” é responsável pela simulação da troca de motores IR2 por motores IR3. Para um melhor entendimento, o fluxograma da função em questão foi dividido em cinco partes. A figura 13 ilustra o fluxograma inicial da função “TROCA MOTOR IR2 IR3 CARGA”.

Figura 13. Fluxograma inicial da função "Troca Motor IR2 IR3 Carga".



Fonte: Autor, 2021.

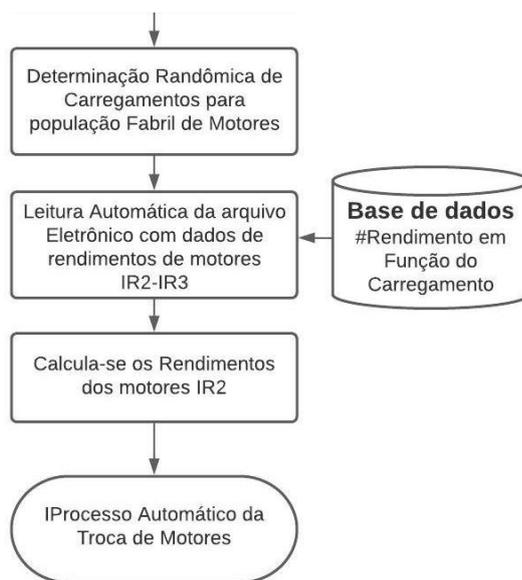
Com base em 13, dentre as entradas utilizadas na função tem-se: a potência (*P*) dos motores ao qual se deseja realizar a troca, a quantidade (*q*) de motores a serem trocados, a taxa de desconto (*d*) utilizada, a taxa da escalada (*ê*), a quantidade de horas/ano trabalhadas para os motores da unidade fabril (*H*), o preço médio do kWh (*T*) e o valor do limite mínimo de carregamento (*limite\_carr*).

Após a entrada dos dados necessários para execução da função é determinado inicialmente os valores mínimos e máximos de carregamento com base na potência do motor,

conforme apresentado na tabela 10 presente na subseção 3.2.1 do presente trabalho. A determinação dos valores mínimos e máximos de carregamento por faixa de potência se faz necessário, uma vez que serão estes limites aplicados na determinação de carregamentos aleatórios na população de motores da unidade fabril objeto de estudo.

Estabelecido os valores mínimos e máximos de carregamento por faixa de potência, o próximo passo será possível determinar aleatoriamente os carregamentos para população fabril de motores, com base no fluxograma ilustrado na figura 14. Devido a elevada quantidade de motores presentes na unidade e a impossibilidade de medição do carregamento de todos esses motores, preferiu-se fazer uso de métodos estatísticos a fim de dar uma maior confiabilidade ao estudo. Dessa forma, os carregamentos são obtidos fazendo-se uso de comandos específicos do simulador utilizado.

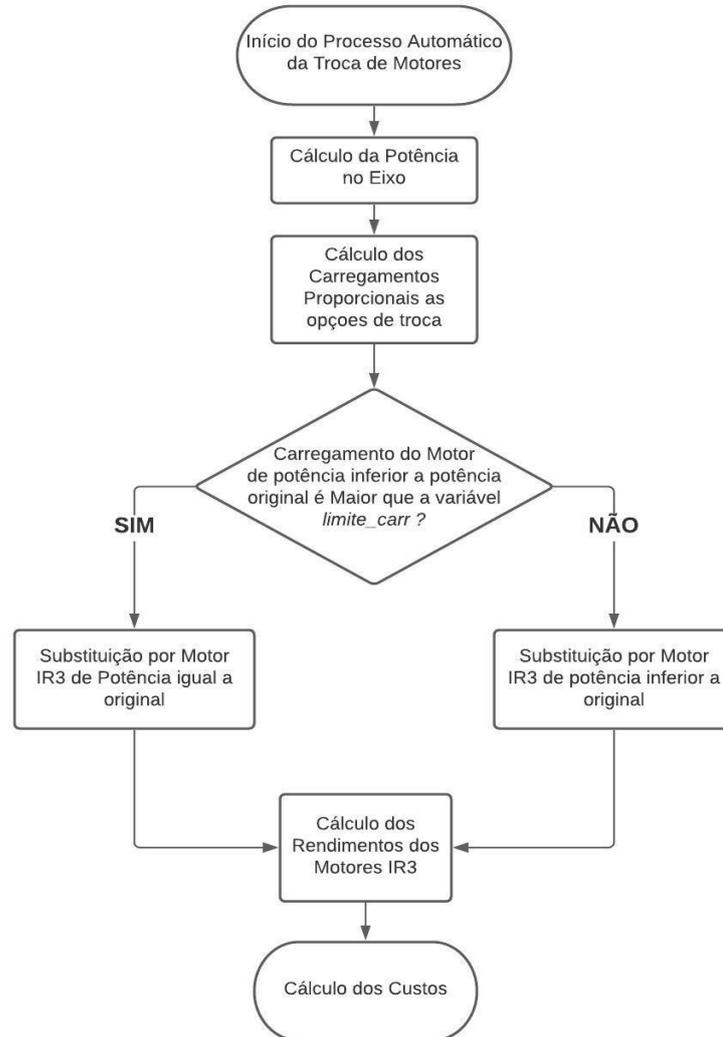
Figura 14. Fluxograma 2 função "Troca Motor IR2 IR3 Carga".



Fonte: Autor, 2021.

Ainda conforme a figura 14, o simulador é instruído a realizar a leitura automática do arquivo eletrônico contendo os dados referentes ao rendimento dos motores IR2 e IR3 em função do carregamento. Com base nos dados lidos, os valores tabelados para os rendimentos dos motores IR2 da população fabril são determinados. O arquivo em questão é apresentado através da tabela 18, presente na subseção 3.5.2 deste trabalho. Com a posse dos dados obtidos nos processos anteriores, é inicializado o processo automático da troca de motores que será explicado com base no fluxograma apresentado na figura 15.

Figura 15. fluxograma do processo automático da troca de motores da função.



Fonte: Autor, 2021.

O processo de troca de motores se inicia com o cálculo da potência no eixo, que se dá através do produto entre a potência do motor ao qual se deseja realizar a troca ( $P_{IR2}$ ) e os carregamentos anteriormente determinados de maneira aleatória para a população destes motores ( $L_{IR2}$ ), conforme apresentado pela equação (35).

$$P_{eixo} = P_{IR2} \times L_{IR2} \quad (35)$$

Assim, serão consideradas como opções de troca apenas motores com valores de potência acima aos da potência no eixo. Com as opções de troca em mãos, é calculado o

carregamento proporcional para esses motores IR3. O novo carregamento é calculado como apresentado na expressão (36)

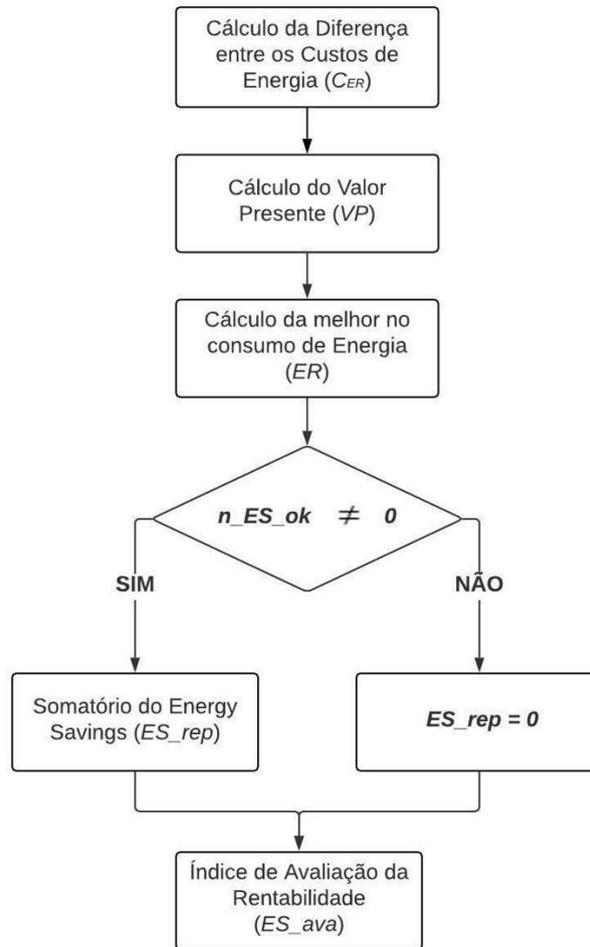
$$L_{novo\_IR3} = \frac{P_{IR2}}{P_{opção\_IR3}} \times L_{IR2} \quad (36)$$

Onde,  $P_{opção\_IR3}$  representa a potência das opções de troca de rendimento IR3. Calculado os novos rendimentos, é feita a verificação do limite máximo de carregamento, dado pela variável de entrada *limite\_carr*. Dessa forma, são testadas as opções de troca que possuem potência inferior a potência original. Caso o carregamento dessas opções seja inferior ou igual ao limite mínimo estabelecido, o motor IR2 será substituído por um motor IR3 de potência inferior a original. Caso o carregamento da opção de troca de menor potência seja maior que o limite, o motor IR2 será substituído por um motor IR3 de potência igual a original.

Realizada a troca, o simulador calcula os rendimentos dos motores substitutos em função de seus carregamentos. Com isso, é finalizada o processo automático da troca de motores, sendo a próxima etapa responsável por calcular os custos e demais parâmetros de saída.

A figura 16 ilustra o fluxograma com a ordem dos parâmetros cálculos na função.

Figura 16. Cálculo dos parâmetros função "TROCA MOTOR IR2 IR3 CARGA".



Fonte: Autor, 2021.

Com base em 16, os primeiros parâmetros a serem calculados são: a diferença entre os custos de energia e o Valor Presente.

A diferença entre os custos de energia ( $C_{ER}$ ), também tratado como custo de energia resultante, pode ser calculado subtraindo o custo da energia do motor de menor rendimento (IR2) do custo da energia do motor de alto rendimento (IR3). A expressão é mostrada através da equação (37).

$$C_{ER} = \left( \left( \frac{P_{IR2} \times L_{IR2}}{\eta(L_{IR2})} \right) - \left( \frac{P_{opção\_IR3} \times L_{novo\_IR3}}{\eta(L_{novo\_IR3})} \right) \right) \times 0,736 \cdot T \cdot H \quad (37)$$

Onde,  $\eta(L_{IR2})$  e  $\eta(L_{novo\_IR3})$  são respectivamente os rendimentos dos motores IR2 e IR3.  $T$  representa o preço médio do kwh e  $H$  as horas/ano de operação do motor. O Valor Presente ( $VP$ ) é calculado conforme apresentado pela equação (38).

$$VP = \sum_{i=1}^t C_{ER} \cdot \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \quad (38)$$

Em que,  $\hat{e}$  representa a taxa de escalada da energia elétrica,  $t$  o tempo do projeto em questão, sendo geralmente representado em anos e  $d$  a taxa de desconto.

De maneira subsequente, é calculado o parâmetro ( $ER$ ) que representa a melhora no consumo de energia devido a nova opção de motor inserida. O mesmo é calculado conforme expressão (39), sendo resultante do produto do custo de energia resultante ( $C_{ER}$ ) e do fator de recuperação de capital ( $F_{RC}$ ).

$$ER = C_{ER} \times F_{RC} \quad (39)$$

O Fator de recuperação do capital é dado pela expressão (40).

$$F_{RC} = \left( \left( \frac{1+\hat{e}}{1-d} \right) \times \left( 1 - \left( \frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right) \right) \quad (40)$$

Por conseguinte, com base na estrutura condicional apresentada na figura 16, são realizados testes a fim de determinar os parâmetros apenas em trocas onde há energia economizada. Assim, caso a quantidade de motores ( $q$ ) motores com energias economizadas rentáveis seja diferente de zero ( $n_{ES\_ok}$ ), é calculado através do parâmetro  $ES\_rep$  a média dos valores de energia economizada entre as trocas rentáveis com base no somatório do *Energy Savings*. Caso não haja motores com troca rentável, essa média será zero.

Por fim, é calculado o índice de avaliação da rentabilidade da energia consumida ( $ES\_ava$ ), sendo resultado da razão entre ( $n_{NS\_ok}$ ) e a tarifa média ( $T$ ). Por último, é obtido através do parâmetro ( $n_{Pmenor}$ ), a quantidade entre os ( $q$ ) motores que na troca podem ser substituídos por motores de menor potência, sendo  $Pvet$  o vetor potência dos motores que foram substituídos.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo abordou de maneira objetiva o funcionamento do programa utilizado para simular a troca de motores em uma indústria. Na construção do mesmo, foram aplicados todos os conhecimentos teóricos e dados apresentados nas seções 2 e 3 deste estudo.

A partir do simulador apresentado, será possível obter todos os parâmetros e custos inerentes ao processo da troca de motores. Aliado a isso, a simulação da troca permite que o simulador seja aplicado em parques fabris diversos e em diferentes localidades, para uma população de “n” motores.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos após as simulações de troca de motores em uma indústria de médio porte com unidades fabris em regiões distintas do Brasil.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção abordará os resultados obtidos após as simulações de troca de motores em uma indústria de médio porte com unidades fabris localizadas nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil.

As regiões Sudeste e Centro-oeste foram escolhidas por apresentarem respectivamente as maiores taxas de escalada. Além disso, a região Sudeste apresenta uma tarifa de energia mediana em relação às demais regiões. A região Centro-Oeste, por sua vez, apresenta a maior tarifa dentre as regiões do Brasil. A escolha de região nordeste se deu por ser a região de referência do presente estudo. Ademais, a mesma apresenta a quarta maior taxa de escalada e a tarifa mais barata entre as regiões.

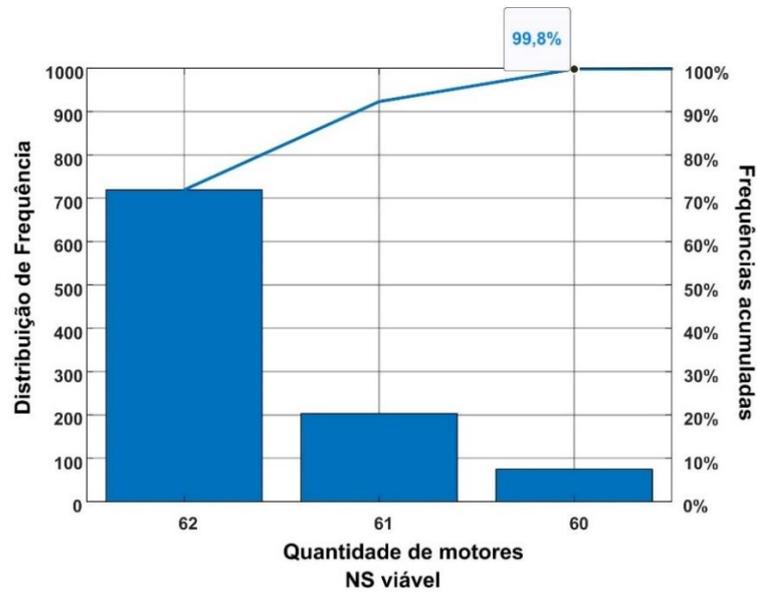
Para cada região, utilizaram-se quatro limites de carregamento para a troca de motores por motor de menor potência, sendo eles: 0,75, 0,80, 0,85 e 0,90. Foram realizadas mil simulações para cada valor de limite de carregamento, ou seja, mil cenários de troca para um mesmo parque industrial por valor de limite de carregamento.

### 5.1 QUANTIDADE DE TROCAS DE MOTORES COM *NET SAVINGS* VIÁVEL

O primeiro resultado a ser apresentado diz respeito à quantidade de motores substituídos que tiveram a economia líquida ou *net savings* viável. Assim, a figura 14 apresenta o gráfico de Pareto do NS viável em relação à distribuição de frequência para os valores de carregamento de 0,75 para região centro-oeste do Brasil.

Através da figura 14, é possível observar a real dimensão da viabilidade da troca de motores. Analisando os mil cenários, pode-se inferir que, em mais de 70% dos casos as trocas produziram um NS viável para todos os 62 motores substituídos. Em 20% apenas um motor não apresentou viabilidade na economia líquida e em menos de 10%, dois motores não apresentaram viabilidade. No total, 99,8% dos cenários após as simulações apresentam viabilidade econômica para um NS viável na faixa entre 60 e 62 motores.

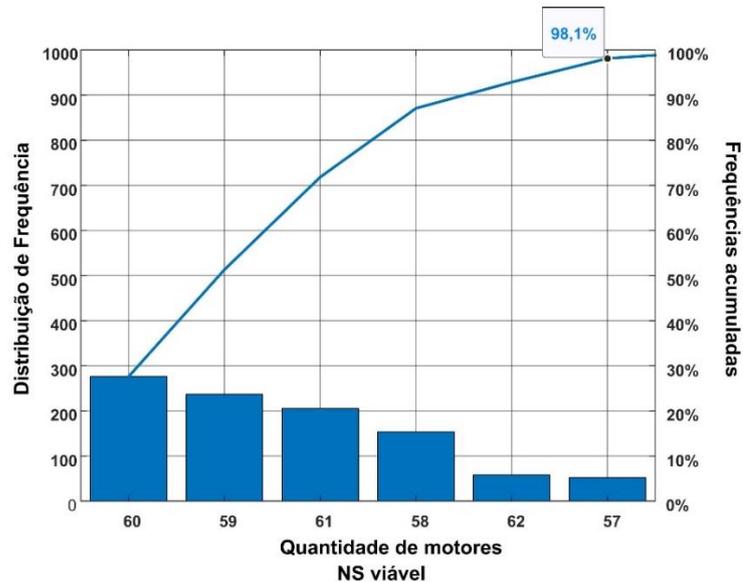
Figura 17. NS viável em relação à distribuição de frequência para o valor do limite do carregamento na troca de 0,75 para região Centro-Oeste.



Fonte: Autor, 2021.

Para efeito de comparação, a figura 15 apresenta o gráfico de Pareto NS viável em relação à distribuição de frequência com carregamento de 0,75 para região nordeste do Brasil.

Figura 18. NS viável em relação à distribuição de frequência para o valor do limite do carregamento na troca de 0,75 para região Nordeste.



Fonte: Autor, 2021

Diferente do apresentado para região Centro-Oeste, com base figura 15 é possível notar uma distribuição de frequências mais fragmentada para a região nordeste. A maior frequência,

que ocorreu em aproximadamente 30% das simulações, apresentou uma viabilidade de NS na substituição de 60 motores com mais frequência. Por conseguinte, a menor frequência, aproximadamente 5%, representa a viabilidade de no mínimo de 57 dos 62 motores substituídos. O total acumulado para os mil cenários simulados apontam que 98,1% dos cenários simulados apresentam uma economia líquida viável para um intervalo de 57 a 62 motores que realizaram trocas de motores viáveis do ponto de vista econômico.

Para fins de simplificação, os gráficos de Pareto que apresentam o NS viável em relação à distribuição de frequência para as demais regiões e valores de carregamento serão apresentados no apêndice B do presente estudo. Entretanto, a tabela 27 apresenta o resumo dos gráficos de viabilidade com base nos valores mínimos e máximos de motores substituídos e na frequência total acumulada.

Tabela 20. Viabilidade com base nos valores mínimos e máximos da quantidade de motores substituídos com NS viável e na frequência total acumulada.

Região	Limite do carregamento para realizar a troca do motor por potência nominal reduzida.	Qtde. de Motores Substituídos com NS Viável		Freq. Total Acumulada (%)
		Mínimo	Máximo	
Nordeste	0,75	57	60	98,10%
	0,80	57	60	99,30%
	0,85	60	62	95,40%
	0,90	57	60	99,30%
Sudeste	0,75	60	62	95,70%
	0,80	60	62	99,20%
	0,85	60	62	99,30%
	0,90	60	62	99,30%
Centro-Oeste	0,75	60	62	99,80%
	0,80	61	62	99,80%
	0,85	-	62	100%
	0,90	-	62	100%

Fonte: Autor, 2021

Por meio da tabela 27, observa-se que para todos os valores do limite no carregamento a região Nordeste apresentou uma maior variação do número de motores substituídos em relação às demais regiões, para uma frequência acumulada de trocas viáveis acima de 95%. Ainda em relação à região Nordeste, em nenhuma simulação os 62 motores substituídos apresentam viabilidade, uma vez que o número máximo foi 60 motores. As disparidades técnicas na viabilidade da troca de motores na região Nordeste se comparado às demais regiões parece se justificar pelo menor valor de taxa de escalada de energia elétrica e o agravante de possuir a menor tarifa média calculada dentre todas as regiões brasileiras.

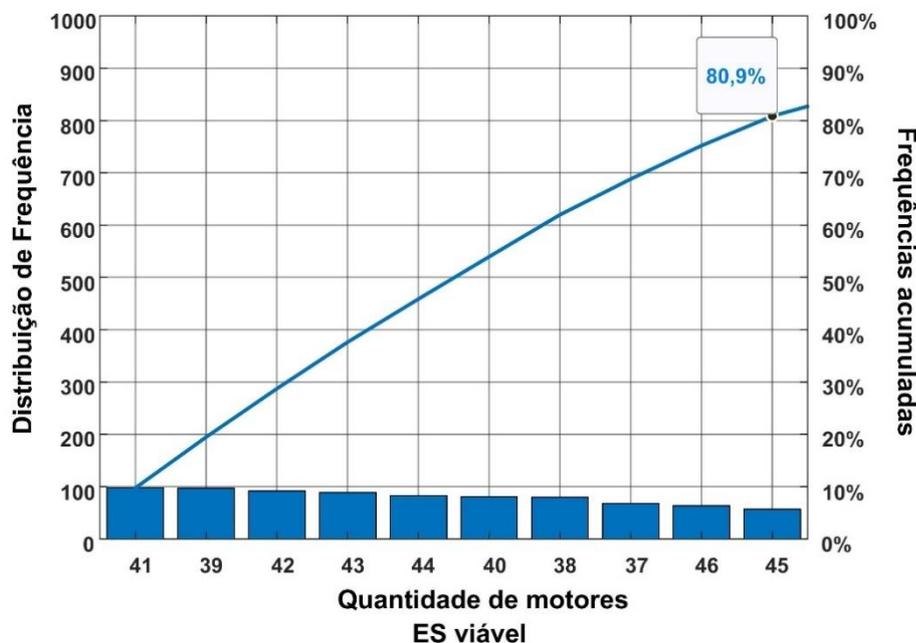
Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, o número máximo de motores substituídos com viabilidade foi de 62 em todas as simulações. Contudo, a região Centro-Oeste apresentou valores mínimos melhores em relação à região Sudeste e conseqüentemente uma frequência acumulada melhor. Dados como esse colocam a região Centro-Oeste como região mais possibilidades de projetos rentáveis na troca de motores envelhecidos por motores mais eficientes.

Em linhas gerais, é válido ressaltar que nenhuma frequência acumulada foi inferior a 95%, confirmando o alto de índice de viabilidade das trocas independente do limite utilizado no carregamento do novo motor com potência nominal reduzida ou região.

## 5.2 QUANTIDADE DE TROCAS DE MOTORES COM *ENERGY SAVED COST* VIÁVEL

De maneira similar ao apresentado na seção 5.1, será apresentada os resultados relativos à quantidade de motores substituídos que apresentaram a energia economizada ou *energy saved Cost* (ES) viável. Para tanto, a figura 16 apresenta o gráfico de Pareto do ES viável em relação à distribuição de frequência para os valores de carregamento de 0,75 para região Centro-Oeste do Brasil.

Figura 19. ES viável em relação à distribuição de frequência para o valor do limite do carregamento na troca de 0,75 para região Centro-Oeste.



Fonte: Autor, 2021.

Através da figura 16, é possível observar a distribuição de frequência relativa à energia economizada viável, resultante das trocas de motores simuladas. Em todas as simulações, a quantidade de motores com ES viável não ultrapassou a frequência de 10%. O valor máximo de motores que apresentaram viabilidade ocorreu em 45 substituições. O valor mínimo ocorreu em 39. A frequência acumulada total foi de 80,9%, ou seja, realizada a simulação de mil cenários diferentes relacionados à troca de motores do parque fabril em questão, a porcentagem que representa a faixa de valores de motores substituídos que possuem energética economizada viável foi de aproximadamente 81%.

Por conseguinte, os demais gráficos de Pareto que apresentam o ES viável em relação à distribuição de frequência para as demais regiões e valores de carregamento serão apresentados no apêndice C do presente estudo. Entretanto, a tabela 28 apresenta o resumo dos gráficos de viabilidade do ES com base nos valores mínimos e máximos de motores substituídos e na frequência total acumulada.

Tabela 21. Viabilidade do ES com base nos valores mínimos e máximos da quantidade de motores substituídos com ES viável e na frequência total acumulada.

Região	Limite do carregamento para realizar a troca do motor por potência nominal reduzida.	Motores Substituídos com ES Viável		Freq. Total Acumulada (%)
		Mínimo	Máximo	
Nordeste	0,75	35	44	79,40%
	0,80	44	52	84,10%
	0,85	48	57	91,20%
	0,90	51	60	96,20%
Sudeste	0,75	36	45	79,30%
	0,80	44	53	84,60%
	0,85	50	58	93,20%
	0,90	51	60	96,70%
Centro-Oeste	0,75	37	45	80,90%
	0,80	44	53	85,70%
	0,85	49	58	92,9%
	0,90	51	60	96,5%

Fonte: Autor, 2021

Por meio da tabela 28, observa-se que os valores mínimos e máximos de motores com ES viável e da frequência acumulada são independentes da região. Entretanto, a grande conclusão com base nos dados apresentados, se dá no fato de que a quantidade de projetos em que energia economizada torna este projeto viável é diretamente proporcional ao aumento no limite do carregamento para a troca por motores de potência ligeiramente inferior a original.

Assim, quanto maior o limite de carregamento utilizado, um maior número de motores apresentará ES viável e conseqüentemente, maior será a energia economizada.

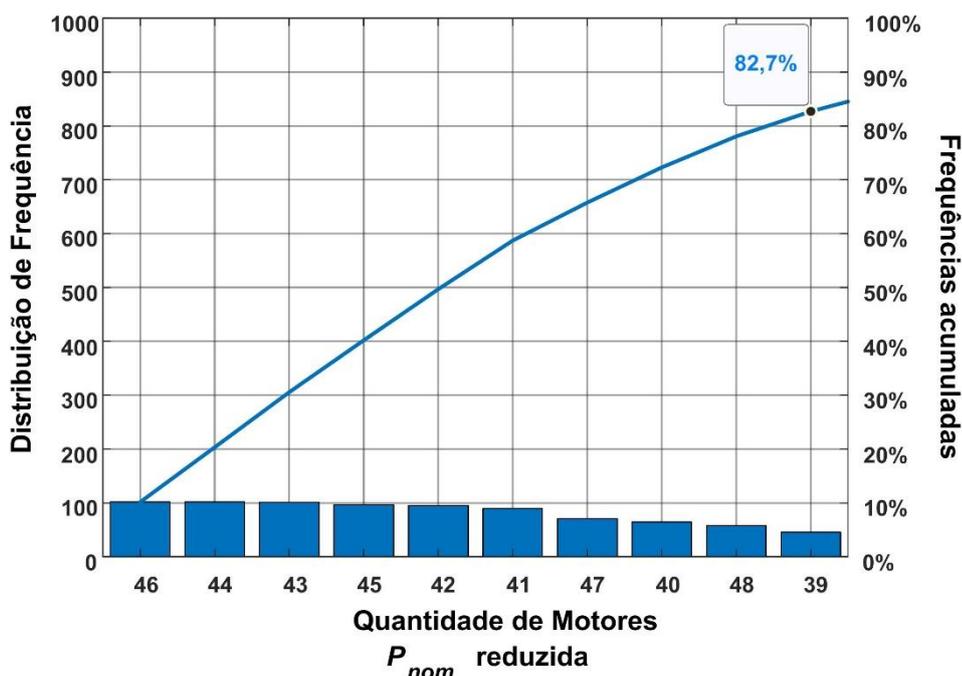
Claramente, vê-se também que se forem utilizados os dois índices, NS e ES, como indicadores de viabilidade o ES é prepondera em relação ao NS, limitando a quantidade de projetos (trocas) realmente viáveis. Esta informação é importante para o gestor de energia da empresa e saber quais os critérios de viabilidade e o impacto destes nos projetos é de extrema importância na tomada de decisões.

### 5.3 QUANTIDADE DE MOTORES SUBSTITUÍDOS COM POTÊNCIA NOMINAL REDUZIDA

Os resultados aqui apresentados são relativos à quantidade de motores substituídos que apresentaram redução em sua potência nominal, ou seja, os motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal inferior aos motores originais (considerados com índice de rendimento IR2).

Dessa forma, a figura 17 apresenta o gráfico de Pareto dos motores que tiveram potência nominal ( $P_n$ ) reduzida na troca em relação à distribuição de frequência para o valor do limite do novo carregamento de 0,75 para região Centro-Oeste do Brasil.

Figura 20. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para um limite do novo carregamento igual a 0,75 na região Centro-Oeste do Brasil.



Fonte: Autor, 2021.

Através da figura 17, é possível observar a distribuição de frequência relativa aos cenários simulados que tiveram potência reduzida em relação à potência original na troca de motores. Como apresentando na imagem, em todas as simulações, a quantidade de motores com potência reduzida não ultrapassou a frequência de 10%. A faixa onde ocorreu a maioria dos casos de redução de potência foi entre 46 substituições e o valor mínimo de 39. A frequência acumulada total foi de 82,7%, ou seja, simulados os mil cenários previstos a porcentagem que representa o valor total de cenários com motores substituídos é de aproximadamente 83%, no caso específico do Centro-Oeste, com base no limite estabelecido de 0,75 no novo carregamento.

Assim como citado nas subseções 5.1 e 5.2, os demais gráficos relativos aos motores que tiveram potência nominal ( $P_n$ ) reduzida em relação à distribuição de frequência por limite do novo carregamento não serão apresentados nessa seção, os mesmos serão apresentados no apêndice D do presente estudo.

Contudo, para melhor ilustrar os demais resultados obtidos, a tabela 29 apresenta o resumo dos gráficos de Pareto que apresentam a distribuição de frequência relativa aos motores substitutos que possuem potência reduzida em relação à potência original.

Tabela 22. Motores substitutos que possuem potência reduzida em relação a potência original.

Região	Limite do carregamento para realizar a troca do motor por potência nominal reduzida.	Motores Substitutos com $P_n$ Inferior		Freq. Total Acumulada (%)
		Mínimo	Máximo	
Nordeste	0,75	39	48	82,00%
	0,80	47	56	88,00%
	0,85	53	62	96,30%
	0,90	57	62	96,60%
Sudeste	0,75	39	48	82,00%
	0,80	47	56	88,50%
	0,85	53	61	95,10%
	0,90	57	62	97,30%
Centro-Oeste	0,75	39	48	82,70%
	0,80	47	56	87,90%
	0,85	53	61	95,7%
	0,90	57	62	96,9%

Fonte: Autor, 2021.

Por meio da tabela 29, observa-se que os valores mínimos, máximos e a frequência acumulada de motores substitutos com potência nominal inferior ao motor original independem

da região, o que já era esperado visto que na análise técnica da troca de motores, não há influência da tarifa média da energia elétrica e tão pouco a taxa de escalada da energia elétrica.

Entretanto, nota-se que o aumento do limite do novo carregamento propicia diretamente o aumento no percentual acumulado e representativo do número de motores com potência inferior além do que reduz a quantidade representativa deste percentual acumulado, isto é, para um limite de 75%, a variação entre 39 e 48 motores (9 valores), já em 90% a variação é menor, entre 57 e 62 motores (5 valores). Outro dado importante é o aumento da média desta faixa representativa com o aumento do limite do novo carregamento. Resultados como estes corroboram com a troca de motores levando-se em conta o aumento do carregamento (uso de potência inferior a original na troca).

#### 5.4 ECONOMIA LÍQUIDA TOTAL OBTIDA APÓS AS TROCAS

Realizadas as simulações, foi possível à aquisição de dados relativos à economia líquida obtida com as trocas. A tabela 30 ilustra a economia líquida média, mínima e máxima por carregamento e região do Brasil.

Tabela 23. Economia Líquida média, mínima e máxima por região do Brasil e respectivo limite do novo carregamento no processo de troca.

Dados - Simulação		Economia Líquida (NS)			
Região	Limite do carregamento para realizar a troca do motor por potência nominal reduzida.	Média	Mínima	Máxima	
Nordeste	0,75	R\$ 90.301,58	R\$ 42.694,78	R\$ 191.298,03	
	0,80	R\$ 95.658,18	R\$ 44.749,14	R\$ 194.580,99	
	0,85	R\$ 99.648,81	R\$ 52.320,24	R\$ 220.659,63	
	0,90	R\$ 99.830,15	R\$ 55.905,35	R\$ 184.382,41	
Sudeste	0,75	R\$ 105.780,70	R\$ 57.349,86	R\$ 191.652,24	
	0,80	R\$ 111.742,31	R\$ 63.966,08	R\$ 192.966,00	
	0,85	R\$ 114.200,18	R\$ 55.021,46	R\$ 227.786,88	
	0,90	R\$ 115.497,07	R\$ 62.969,21	R\$ 223.256,36	
Centro-Oeste	0,75	R\$ 110.491,98	R\$ 54.828,61	R\$ 227.892,04	
	0,80	R\$ 115.263,54	R\$ 56.824,39	R\$ 231.759,26	
	0,85	R\$ 118.307,91	R\$ 70.626,76	R\$ 211.221,66	
	0,90	R\$ 119.103,11	R\$ 67.789,07	R\$ 218.755,13	

Fonte: Autor, 2021

Analisando inicialmente a região Nordeste, com base na tabela 30, é interessante ressaltar que todos os valores de economia líquida ou *net savings* (NS) foram positivos para as trocas realizadas. Dessa forma, a troca dos motores do parque fabril se mostraram viáveis para todos os limites dos novos carregamentos dos motores.

Ainda sobre a região Nordeste, nota-se que o crescimento do valor médio e mínimo da economia líquida é diretamente proporcional ao valor do carregamento. Assim, quanto maior o carregamento, maior o NS médio resultante e o mínimo da troca de motores para esta região. Por sua vez, o valor máximo obtido pelas trocas não obedece a esta proporcionalidade.

Ao analisarmos a região Sudeste do país, nota-se que todos os valores de NS foram positivos para as trocas realizadas, assim como na região nordeste. Entretanto, o padrão de crescimento diretamente proporcional ao carregamento da economia líquida se repete apenas para o valor médio. O valor mínimo, assim como o valor máximo, não apresenta nenhum padrão em relação ao aumento ou a diminuição do carregamento.

Por fim, assim como as demais regiões, o centro-oeste do Brasil também apresenta valores positivos de NS para todas as trocas realizadas. Além disso, é notado também, a proporcionalidade do valor médio em relação ao aumento do carregamento. Por sua vez, os valores mínimos e máximos não apresentam nenhum padrão em relação ao aumento ou diminuição do carregamento.

A cerca do supracitado, pode-se inferir com base nas simulações realizadas em regiões distintas do Brasil que a escolha de motores (IR3) de carregamento maior que o original (IR2) apresenta um crescimento médio de economia líquida, ou seja, apresentam uma rentabilidade média diretamente proporcional ao aumento do limite estabelecido no novo carregamento devido à possibilidade de redução de potência nominal do novo motor. Por conseguinte, a tabela 31 apresenta um resumo comparativo das melhores regiões por faixa de carregamento para economia líquida mínima, máxima e média.

Tabela 24. Comparativo por região do maior valor de economia líquida média, mínima e máxima por carregamento.

Dados - Simulação	Economia Líquida (NS)		
	Média	Mínima	Máxima
Limite do carregamento para realizar a troca do motor por potência nominal reduzida.			
0,75	Centro-Oeste	Sudeste	Centro-Oeste
0,80	Centro-Oeste	Sudeste	Centro-Oeste
0,85	Centro-Oeste	Centro-Oeste	Sudeste
0,90	Centro-Oeste	Centro-Oeste	Sudeste

Fonte: Autor, 2021

Conforme observado na tabela 31, a região Centro-Oeste possui a melhor média de economia líquida dentre as regiões estudadas. Em relação aos valores mínimos, para valores menores de carregamento a região Sudeste apresenta melhores valores, isto é, os melhores

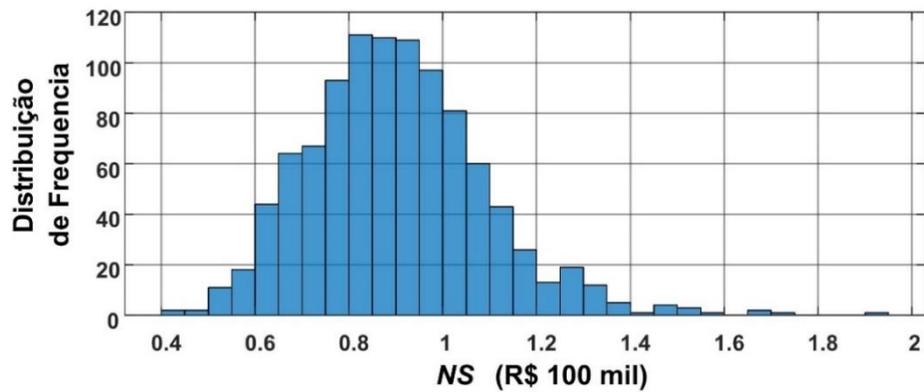
limites financeiros possíveis de rentabilidade. Entretanto, com aumento do carregamento, a região Centro-Oeste tem valores mínimos melhores de NS. O contrário acontece com os valores máximos de NS obtidos nas simulações. Nesse cenário, os valores menores do limite do novo carregamento dão vantagem à região Centro-Oeste nos valores máximos de NS. Em contrapartida, o aumento do limite do novo carregamento é mais vantajoso para região sudeste em termos máximos de NS. A região Nordeste não apresentou melhor índice em nenhuma das análises realizadas.

Outro fator interessante a ser ressaltado é que apesar da região Sudeste apresentar uma maior taxa de escalada em relação à região centro-oeste, 3,35 e 3,17% respectivamente, essa diferença não foi suficientemente grande para consolidar os melhores índices de economia líquida para região sudeste. Dessa forma, conclui-se que a tarifa média se mostrou um parâmetro de grande influência na análise, uma vez que a região centro-oeste apresenta a maior tarifa dentre todas as regiões (R\$/MWh 511,47), tendo isso implicado diretamente nos valores de NS obtidos.

Em linhas gerais, por apresentar as maiores médias de economia líquida em para todos as análises que levaram em conta o limite do novo carregamento, pode-se inferir que a região Centro-Oeste é a melhor região na classe de consumo industrial para realização da troca de motores, seguido pela região sudeste. A fim de corroborar com as informações supracitadas e para melhor ilustrar os resultados obtidos, os mesmos serão apresentados graficamente. Os gráficos serão apresentados em forma de histograma. Conforme Triola (2017), os gráficos em histograma se apresentam como uma excelente opção para análise de variáveis numéricas.

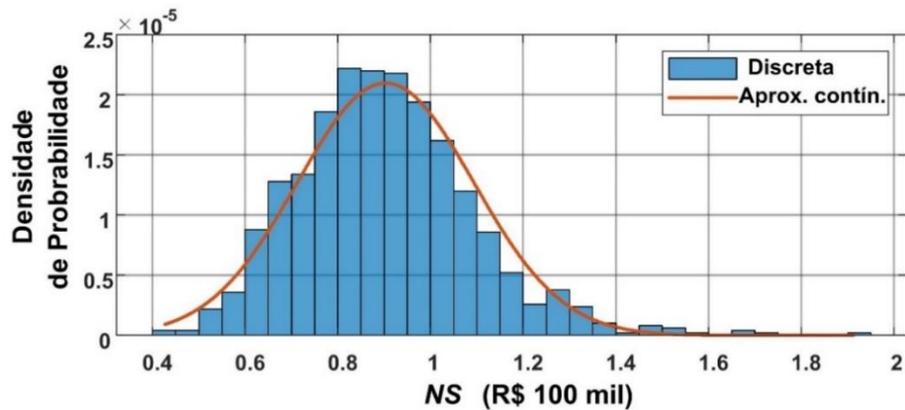
Assim, as figuras 18 a 23 representam os histogramas relativos do NS em função da distribuição de frequência (total NS da troca dos motores em cada cenário) e da densidade de probabilidade, para o limite do novo carregamento de 0,75 nas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, respectivamente.

Figura 21. *Net Savings* em função da distribuição de frequência para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Nordeste.



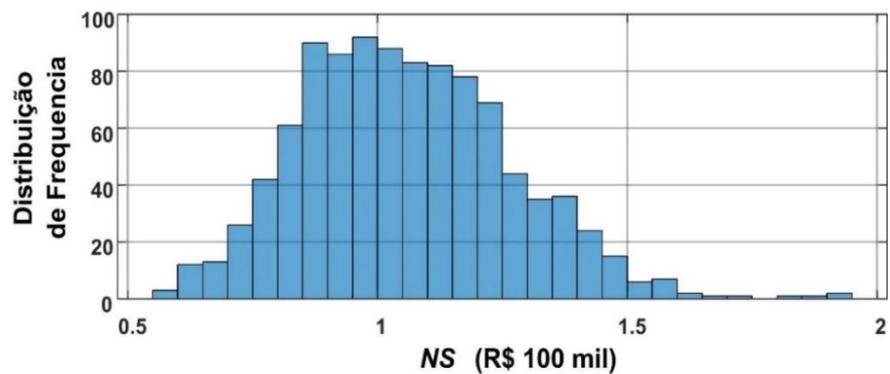
Fonte: Autor, 2021.

Figura 22. *Net Savings* em função da densidade de probabilidade para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Nordeste.



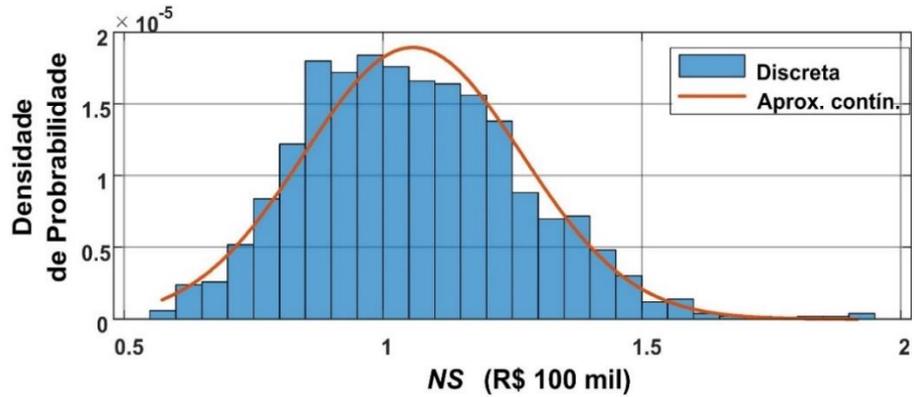
Fonte: Autor, 2021.

Figura 23. *Net Savings* em função da distribuição de frequência para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Sudeste.



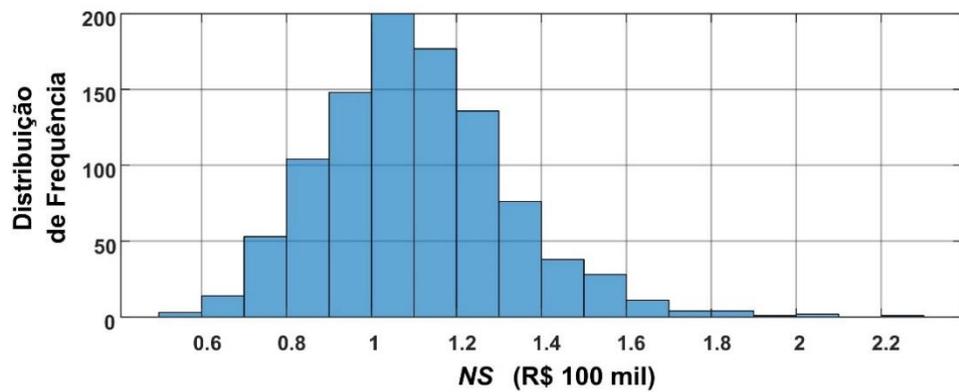
Fonte: Autor, 2021.

Figura 24. *Net Savings* em função da densidade de probabilidade para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Sudeste.



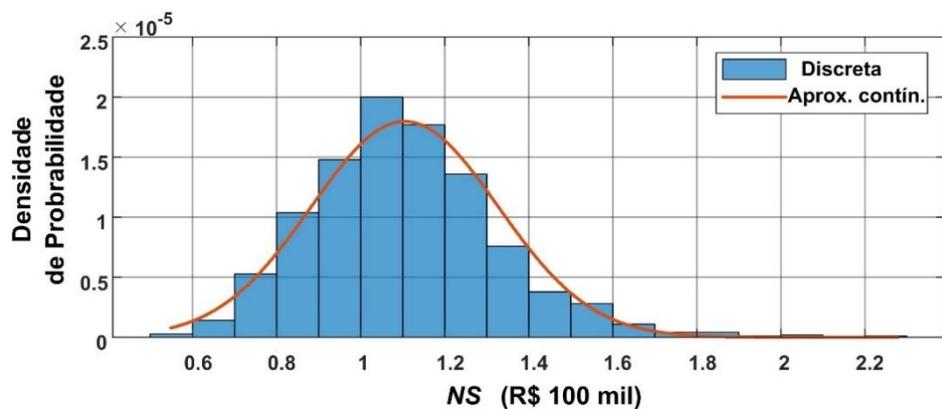
Fonte: Autor, 2021

Figura 25. *Net Savings* em função da distribuição de frequência para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Centro-Oeste.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 26. *Net Savings* em função da densidade de probabilidade para um limite do novo carregamento de 0,75 na região Centro-Oeste.



Fonte: Autor, 2021.

Com base nos histogramas apresentados nas figuras 18 a 23 nota-se que em todos os cenários apresentados tem uma economia líquida positiva, ou seja, são viáveis. Esse padrão se repete em todos os cenários para os demais valores de carregamento, conforme apresentado no apêndice E do presente trabalho.

Nas figuras 18, 20 e 23, é possível observar a curva continua aproximada da função densidade de probabilidade apresentada. Através destas curvas, é possível determinar o grau de assimetria do gráfico em questão.

Conforme Bussab e Morettin (2009), diz-se que uma distribuição é simétrica quando a moda, a média e a mediana coincidem de num mesmo ponto, de ordenada máxima. Em contrapartida, a assimetria implica em valores de moda, média e mediana em pontos diferentes, enviesados à direita ou à esquerda. A equação (41) apresenta a expressão para o cálculo do coeficiente assimetria de *Pearson*.

$$A_p = \frac{(\bar{x} - Mo)}{S} \quad (41)$$

Onde,  $\bar{x}$  é a média da economia líquida para aquele cenário, *Mo* a moda e *S* o desvio padrão. Para valores de  $A_p$  maiores que 0, as distribuições serão assimétricas positivas, para valores menores que 0, assimétricas negativas e iguais a 0, serão simétricas. A tabela 32 apresenta os valores do coeficiente de assimetria calculados com base nos valores de carregamento e região.

Tabela 25. Cálculo do coeficiente assimetria de *Pearson*.

Região	Limite do carregamento para realizar a troca do motor por potência nominal reduzida.	Coefficiente de Assimetria de <i>Pearson</i>
Nordeste	0,75	0,702
	0,80	0,702
	0,85	0,975
	0,90	0,463
Sudeste	0,75	0,438
	0,80	0,404
	0,85	0,727
	0,90	0,691
Centro-Oeste	0,75	0,70
	0,80	0,723
	0,85	0,489
	0,90	0,489

Fonte: Autor, 2021.

Conforme a tabela 32, pode-se inferir que todas as funções apresentam uma distribuição assimétrica positiva ou à direita, pois em todos os casos, os valores de coeficiente possuem valores maiores que zero, conforme Ribeiro (2009). Assim, apesar da média sofrer uma influência pelos dados á direita da curva, a maioria das observações, ou seja, as maiores frequências e conseqüentemente probabilidades, ocorrerão em valores abaixo da média (TRIOLA, 2017). Dessa forma, é ressaltada a importância de analisar os valores médios e mínimos da economia líquida em análises que possuem assimetria à direita.

Outro parâmetro estatístico a ser analisado com base nos histogramas é a curtose. A curtose mede o grau de achatamento de uma distribuição, em relação a distribuição normal ou assimétrica (RIBEIRO, 2009). A expressão (42) apresenta a fórmula utilizada para o cálculo da curtose dos dados obtidos.

$$g_2 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (42)$$

Onde,  $x_i$  representa os valores de economia líquida (NS) encontrados por cenário.  $\bar{x}$  é a média da economia líquida para aquele cenário e  $N$  o número de cenários.

Se o valor da curtose for igual a 3, a distribuição é conhecida como mesocúrtica, tendo o mesmo achatamento que a distribuição normal. Se o valor é maior que 3, diz-se que esta função de probabilidade é leptocúrtica, onde a distribuição em questão é mais alta (afunilada) e concentrada em relação a distribuição normal. Já para o valor menor que 3 então a função de distribuição recebe o nome de platicúrtica, sendo mais "achatada" que a distribuição normal. A tabela 33 apresenta os valores de curtose calculados com base nos valores de carregamento e região.

Tabela 26. Cálculo da curtose para os valores simulados.

Região	Limite do carregamento para realizar a troca do motor por potência nominal reduzida.	Curtose
Nordeste	0,75	4,54
	0,80	4,65
	0,85	6,19
	0,90	4,02
Sudeste	0,75	3,30
	0,80	3,16
	0,85	4,76
	0,90	4,50
Centro-Oeste	0,75	4,54
	0,80	4,66
	0,85	3,44
	0,90	4,08

Fonte: Autor, 2021

Conforme observado na tabela 33, todos os valores da curtose calculados apresentaram índice maior que 3. Logo, todas as distribuições são leptocúrticas. Dessa forma, conclui-se que é relativamente fácil obter valores que não se aproximam da média e valores múltiplos do desvio padrão.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, realizou-se um estudo relativo à troca de motores de indução com níveis de rendimento indefinidos por motores de nível IR3 utilizando o método da análise de custo de ciclo de vida para avaliar o impacto econômico desta troca. As trocas foram feitas de maneira automática com auxílio de software específico de simulação, levando em conta o nível de carregamento do motor, isto é, em carregamentos muito baixos foi analisada a troca por um motor de potência inferior, elevando o carregamento do motor na devida operação.

Foi introduzida, para fins deste estudo, a variável denominada “limite do novo carregamento após a troca por motor de potência nominal inferior”. Esta variável ajudou a estratificar relações entre as variáveis técnicas e econômicas do estudo.

O estudo foi feito utilizando a população de motores de um parque industrial real já utilizado em trabalhos anteriores deste grupo de pesquisa. A ideia do trabalho foi, a partir desta planta, idealizá-la pertencente a uma empresa industrial que possui plantas filiais semelhantes em regiões diferentes do Brasil (típico em indústrias de bens de consumo de médio e grande porte). Os resultados obtidos foram divididos e apresentados na ordem que segue os parágrafos subsequentes.

Os primeiros resultados dizem respeito ao número de motores substituídos que apresentam economia líquida ou *net savings* (NS) viável. Foram apresentados os gráficos em diagrama de Pareto a fim de melhor ilustrar a análise. No geral, os dados mostraram no total que no mínimo 95% dos cenários simulados possuem uma economia líquida viável em mais de 90% dos motores presentes no parque fabril. Entretanto, a região Centro-Oeste apresentou valores mínimos de economia líquida melhores e frequências acumuladas maiores que as demais regiões. Tal fato tende a se justificar muito em virtude desta região possuir uma alta taxa de escalada de energia elétrica (segunda maior do Brasil, entre as regiões) e a maior tarifa média de energia elétrica do país.

Em segundo lugar, mas não menos importante o índice de energia economizada ou *Energy Saved Cost* (ES) viável. Neste índice, vê-se uma relação direta entre a viabilidade e o limite do novo carregamento após a troca por motor de potência nominal inferior. Quanto maior for este limite na troca de motores, maior é a quantidade e projetos (motores trocados) com energia economizada viável. Este parâmetro sendo utilizado na tomada de decisão gerencial em

conjunto com a economia líquida tende a ser mais limitante, ou criterioso, que a própria economia líquida.

Isto corre, pois se comparado ao estudo anterior, o *energy saved Cost* apresentou uma distribuição de frequência maior, ou seja, mais fragmentada em relação ao *net savings*.

De maneira subsequente foi apresentado os dados obtidos relativos aos motores trocados que apresentaram potência inferior a potência nominal do motor original. Assim como no estudo do ES, o aumento de carregamento teve influência proporcional e direta no número de motores trocados que possuíam potência inferior. Resultados como este corroboram com a inserção do limite do novo carregamento como um fator importante em estudos relacionados à troca de motores.

Por fim, foi apresentada a economia líquida total obtida após a simulação dos cenários. Todos os resultados obtidos foram positivos, ou seja, atestaram a viabilidade econômica da troca. Além disso, por apresentar as maiores médias de economia líquida para todos os cenários de carregamento, concluiu-se que a região Centro-Oeste é a região na classe de consumo industrial com melhores indicadores para realização da troca de motores, seguido de perto da região Sudeste. Sobre estes dados, é interessante ressaltar que a região Centro-Oeste não apresenta a maior taxa da escalada dentre as regiões. Entretanto, a mesma apresenta a maior tarifa média de energia elétrica. Dessa forma, pode-se inferir que a tarifa também possui grande influência na determinação do NS, assim como a taxa de escalada de energia elétrica.

Em linhas gerais, o estudo se apresentou satisfatório uma vez que todos os objetivos previamente propostos foram atingidos.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido permite a seleção de alguns pontos para estudos e aplicações subsequentes. Assim, são apresentadas como propostas para trabalhos futuros:

- Aplicação da metodologia utilizada com sistemas de geração distribuída. Em específico, sistemas fotovoltaicos;
- Aplicação da metodologia em classes de consumo diferentes e em projetos de eficiência específicos de cada classe;
- Continuar os estudos da influência da energia economizada e da tarifa média de energia na determinação da Economia Líquida;

- Desenvolvimentos de simuladores que levem em consideração motores com diferentes números de polos na realização da troca.
- Desenvolvimentos de simuladores que levem em consideração a melhor potência nominal como opção de troca e não somente a potência imediatamente inferior.

## 6.2 PUBLICAÇÕES

A referida dissertação resultou até o presente momento na seguinte publicação:

GONÇALVES JÚNIOR, Adriano Araújo *et al.* Influência da Taxa de Escalada da Energia Elétrica na Viabilidade dos Motores Industriais IR3 no Brasil. In: IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS, 14., 2021, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Usp, 2021. p. 1-8.

- Aceito em formato final;
- Apresentado.

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 5383-1 Máquinas Elétricas Girantes Parte 1: Motores de Indução Trifásicos-Ensaio. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. . **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição**. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>. Acesso em: 15 mar. 2021.

Aguiar, V. P. B., Pontes, R. S. T. e Ferreira, F. J. T. E. (2018) Technical and Economic Evaluation of Efficiency Improvement after Rewinding in Low Power Induction Motors: A Brazilian Case. **Energies**. 11, 1701.

AGUIAR, Victor de Paula Brandão. **Avaliação técnico-econômica do aumento do rendimento em motores de indução trifásicos de baixa potência após rebobinagem**. 2018. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

AMERICO, M. **Sistemas Motrizes: Eficiência Energética e Técnicas de Acionamento**. Apresentações em Power-Point em curso Cepel/Sebrae-RJ/UFF. Niterói-RJ, 2003.

ANDRADE, C. T. C.; PONTES, R. S. T. Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors. **Energy Policy**, v. 106, p. 315–325, 2017.

ANDRADE, Cássio Tessandro de Castro. **Uma Abordagem Determinística com Análise de Incerteza para a Viabilidade de Programas de Eficiência Energética**. 2017. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

ANEEL. ANEEL - Essencial para a energia. Essencial para o Brasil.: **O que a ANEEL faz?**. 2020. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/aneelessencial//asset\\_publisher/c4M6OIOMkLad/content/o-que-a-aneel-faz?inheritRedirect=false](https://www.aneel.gov.br/aneelessencial//asset_publisher/c4M6OIOMkLad/content/o-que-a-aneel-faz?inheritRedirect=false)>. Acesso em: 08 jun. 2020.

ANEEL. **Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética**. Brasília: 2008. ANEEL. **Temas para investimentos em P&D**. Disponível em:

<<https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/>>. Acesso em: 13 mar.2021.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. . **PROJETO PRIORITÁRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: “INCENTIVO À SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS: PROMOVEDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SEGMENTO DE FORÇA MOTRIZ”**. Brasília: Aneel, 2015. Disponível em: [encurtador.com.br/otBC2](http://encurtador.com.br/otBC2). Acesso em: 16 maio 2021.

BRASIL. Constituição (2002). Decreto nº 4.508, de 11 de dezembro de 2002.

**Regulamentação Específica Que Define Os Níveis Mínimos de Eficiência Energética de Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo**. Brasília, 11 dez. 2002.

Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2002/d4508.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4508.htm). Acesso em: 15 maio 2021.

BRASIL. Lei nº 10.297, de 17 de outubro de 2001. **Lei de Eficiência Energética**. Brasília, 17 out. 2001. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2001/lei-10295-17-outubro-2001-408176-norma-pl.html>. Acesso em: 15 maio 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. . **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2020 – Ano base 2019**. EPE, 2020 264 p. Disponível em: < <https://cutt.ly/HnNOvMC>> Acesso em: 12 mar. 2021

BUSSAB, Wilton de O.; MORETTIN, Pedro A.. **Estatística Básica**. São Paulo: Saraiva, 2009.

CELIK, Ali Naci. Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle techno-economic analysis of a grid-connected photovoltaic-house. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 10, n. 1, p. 371-386, set. 2004.

FULLER, S. K.; PETERSEN, S. R. **Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program**. NIST Handbook 135. 1995.

GARCIA, Agenor Gomes Pinto. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. 2003. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

GONCALVES JUNIOR, Adriano Araújo et al. Influência da Taxa de Escalada da Energia Elétrica na Viabilidade dos Motores Industriais IR3 no Brasil. In: THE IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 14., 2021, Campinas. **Anais [...]** . Campinas: Unicamp, 2021. p. 1-8.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. **Portaria nº 488**. Brasília: INMETRO, 2010.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Inflação**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>. Acesso em: 15 fev. 2021.

KOSOW, Irving L.. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005. 667 p.

LIMA, Kelly C. D. et al. **Avaliação Técnico-Econômica da Troca de Motores Industriais pela Análise do Carregamento e Cálculo da Economia Líquida em uma Indústria Salineira**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 8., 2020, Santo André. Anais [...]. Santo André: Ufabc, 2020. v. 1, p. 1-6.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Constituição (2005). Portaria Interministerial nº 553, de 8 de dezembro de 2005. **Programa de Metas de Motores Elétricos de Indução Trifásicos**.. Brasília, 8 dez. 2005.

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/doi-2017-08-30-portaria-interministerial-n-1-de-29-de-junho-de-2017-19266690](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19266787/doi-2017-08-30-portaria-interministerial-n-1-de-29-de-junho-de-2017-19266690). Acesso em: 15 maio 2021.

NILSSON, J., BERTLING, L. **Maintenance Management of Wind Power Systems Using Condition Monitoring systems** – Life Cycle Cost Analysis for Two Case Studies. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 22, p. 223–229, 2007.

PG ABAS, A. E., JED YONG, MAHLIA, T. M. I., HANNAN, M. A. **Techno-Economic Analysis and Environmental Impact of Electric Vehicle**. IEEE Access, v. 7, p. 98565–98578, 2019.

PROGRAMME, D. **Energy and the Challenge of Sustainability Assessment**. 2000. Disponível em: <<http://www.amazon.com/dp/9211261260>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

RIBEIRO, Samuel de Oliveira. **Bioestatística**. São Cristovão: Cesad - Universidade Federal de Sergipe, 2009.

SAUER, I. L. et al. A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 38-318, 2015.

SIDRA / IBGE. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**. 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1737>. Acesso em: 15 maio 2021.

SILVA, Marcos Antonio da. INFLUÊNCIA DE FATORES DA MANUTENÇÃO QUE AFETAM A VIDA ÚTIL DOS MOTORES DE INDUÇÃO. In: IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 8., 2008, Poços de Caldas. Anais [...] . Poços de Caldas: Induscon, 2008. p. 1-7.

SOUZA, Danilo Ferreira de. **Uma avaliação do desempenho de motores elétricos de indução trifásicos comercializados no brasil entre 1945 – 2016 e o impacto da legislação brasileira**. 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

STEINBACH, J.; STANIASZEK, D. Discount rates in energy system analysis Discussion Paper. [s.l: s.n.].

THORNTON, D. L. **The Discount Rate and Market Interest Rates : What ' s the Connection ?**. Federal Reserve Bank of St Louis, 1980.

TRIOLA, Mário F.. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: Ltc, 2017.

USDE - United States Department of Energy. PREMIUM EFFICIENCY MOTOR SELECTION AND APPLICATION GUIDE. New York: U. S. Department Of Energy, 2014.

WEG. **Motores Elétricos** - W22. 2021. Disponível em:

[https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Usos-Gerais/W22/c/BR\\_MT\\_3PHASE\\_LV\\_W22](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Usos-Gerais/W22/c/BR_MT_3PHASE_LV_W22). Acesso em: 16 maio 2021.

XUEWEI, Y.; MORENO-CRUZ, J.; CRITTENDEN, J. C. **Regional Energy rebound Effect: The impact of economy-wide and sector level energy efficiency improvement.** *Energy Policy*, v. 87, p. 250–259, 2015

## APÊNDICE A - RECEITA E CONSUMO DE ENERGIA PARA CLASSE DE CONSUMO INDUSTRIAL DO BRASIL

Tabela A1. Consumo e Receita de energia para região centro-oeste.

Ano	Consumo de Energia Elétrica (MWh)	Receita de Fornecimento de Energia Elétrica (Reais)
<b>1996</b>	2696131,00	R\$ 154.905.064,00
<b>1997</b>	2890221,00	R\$ 179.335.214,00
<b>1998</b>	2807390,00	R\$ 189.659.448,00
<b>1999</b>	2969874,00	R\$ 220.012.284,00
<b>2000</b>	3335983,00	R\$ 273.632.434,00
<b>2001</b>	3335176,00	R\$ 310.630.723,00
<b>2002</b>	3663523,00	R\$ 378.141.392,00
<b>2003</b>	3878972,38	R\$ 529.976.229,09
<b>2004</b>	3460928,01	R\$ 616.323.746,80
<b>2005</b>	2965035,15	R\$ 641.469.247,73
<b>2006</b>	2845697,66	R\$ 652.601.101,23
<b>2007</b>	3251466,10	R\$ 707.947.774,58
<b>2008</b>	3669707,77	R\$ 733.840.179,32
<b>2009</b>	3806846,53	R\$ 805.065.426,41
<b>2010</b>	3939219,22	R\$ 860.599.849,32
<b>2011</b>	3646604,32	R\$ 821.469.720,90
<b>2012</b>	3869640,56	R\$ 871.907.872,74
<b>2013</b>	4074125,59	R\$ 814.823.026,14
<b>2014</b>	4241365,14	R\$ 922.716.353,75
<b>2015</b>	4021234,12	R\$ 1.329.450.227,10
<b>2016</b>	3414375,68	R\$ 1.177.746.523,29
<b>2017</b>	2355883,88	R\$ 895.649.247,89
<b>2018</b>	2136853,94	R\$ 990.298.598,75
<b>2019</b>	1731484,79	R\$ 832.272.065,25
<b>2020</b>	1661482,00	R\$ 849.797.647,89

Fonte: Autor, 2021.

Tabela A 2. Consumo e Receita de energia para região nordeste.

<b>Ano</b>	<b>Consumo de Energia Elétrica (MWh)</b>	<b>Receita de Fornecimento de Energia Elétrica (Reais)</b>
<b>1996</b>	7805054,00	R\$ 488.612.291,00
<b>1997</b>	8270348,00	R\$ 547.746.100,00
<b>1998</b>	8720073,00	R\$ 595.897.007,00
<b>1999</b>	8803653,00	R\$ 639.124.225,00
<b>2000</b>	9377838,00	R\$ 735.842.224,00
<b>2001</b>	8653562,00	R\$ 770.604.029,00
<b>2002</b>	9176926,00	R\$ 938.093.183,00
<b>2003</b>	8945768,06	R\$ 1.187.857.021,14
<b>2004</b>	9071219,29	R\$ 1.436.050.707,68
<b>2005</b>	8386070,65	R\$ 1.563.999.060,40
<b>2006</b>	7388518,59	R\$ 1.586.399.712,73
<b>2007</b>	7693944,41	R\$ 1.684.877.278,68
<b>2008</b>	9653456,49	R\$ 2.009.121.372,26
<b>2009</b>	10274434,54	R\$ 2.187.450.491,62
<b>2010</b>	9968464,57	R\$ 2.237.226.879,34
<b>2011</b>	9904007,51	R\$ 2.360.611.987,30
<b>2012</b>	8611475,74	R\$ 2.222.447.208,40
<b>2013</b>	8012987,91	R\$ 1.738.176.025,11
<b>2014</b>	8466810,65	R\$ 2.025.359.816,05
<b>2015</b>	8097950,55	R\$ 2.541.777.319,18
<b>2016</b>	7468399,24	R\$ 2.519.150.846,70
<b>2017</b>	5479705,48	R\$ 2.023.841.219,58
<b>2018</b>	5017200,46	R\$ 2.064.547.092,44
<b>2019</b>	4001297,32	R\$ 1.722.072.123,06
<b>2020</b>	3338155,74	R\$ 1.522.467.336,48

Fonte: Autor, 2021.

Tabela A3. Consumo e Receita de energia para região norte.

<b>Ano</b>	<b>Consumo de Energia Elétrica (MWh)</b>	<b>Receita de Fornecimento de Energia Elétrica (Reais)</b>
1996	676062,00	R\$ 60.270.466,00
1997	760847,00	R\$ 70.593.589,00
1998	1514189,00	R\$ 155.225.783,00
1999	1620105,00	R\$ 168.365.459,00
2000	1883194,00	R\$ 200.501.420,00
2001	1936977,00	R\$ 208.678.422,00
2002	2148840,00	R\$ 268.258.678,00
2003	2438569,41	R\$ 368.421.357,79
2004	2702477,61	R\$ 459.572.667,29
2005	2857451,75	R\$ 566.048.338,61
2006	2950621,76	R\$ 663.612.422,00
2007	3163032,75	R\$ 687.961.384,92
2008	3410809,60	R\$ 787.700.909,85
2009	3210603,07	R\$ 816.929.162,48
2010	4340287,08	R\$ 866.319.178,94
2011	3824016,03	R\$ 957.285.019,25
2012	3802360,30	R\$ 1.041.003.031,56
2013	3911249,80	R\$ 887.113.930,06
2014	3948711,14	R\$ 965.706.574,32
2015	3776497,46	R\$ 1.167.800.495,12
2016	3062315,47	R\$ 1.106.031.356,75
2017	1986890,75	R\$ 861.198.030,71
2018	1782268,12	R\$ 886.441.381,46
2019	1551984,64	R\$ 814.576.510,28
2020	1526039,85	R\$ 779.005.492,88

Fonte: Autor, 2021.

Tabela A4. Consumo e Receita de energia para região sudeste.

<b>Ano</b>	<b>Consumo de Energia Elétrica (MWh)</b>	<b>Receita de Fornecimento de Energia Elétrica (Reais)</b>
1996	72045538,00	R\$ 3.805.429.380,00
1997	75619258,00	R\$ 4.289.636.918,00
1998	74864033,00	R\$ 4.432.583.202,00
1999	73823266,00	R\$ 4.892.569.926,00
2000	76589450,00	R\$ 5.749.726.985,00
2001	69902708,00	R\$ 6.089.586.627,00
2002	69777069,00	R\$ 7.142.871.287,00
2003	61674900,19	R\$ 8.119.867.080,82
2004	55943883,70	R\$ 8.803.908.514,90
2005	37613787,00	R\$ 7.499.145.592,42
2006	32474012,78	R\$ 7.185.599.637,55
2007	32014521,56	R\$ 7.463.854.527,19
2008	34113895,78	R\$ 7.517.466.390,18
2009	31993161,45	R\$ 7.698.017.440,53
2010	32465059,75	R\$ 7.863.410.846,27
2011	31693635,95	R\$ 7.898.862.911,66
2012	29188847,80	R\$ 7.554.519.679,47
2013	28020301,09	R\$ 6.517.685.888,17
2014	27468176,67	R\$ 7.093.259.750,84
2015	25354851,02	R\$ 10.076.221.382,74
2016	20804699,70	R\$ 8.735.462.204,23
2017	16094599,57	R\$ 6.537.097.968,83
2018	14966947,64	R\$ 6.874.305.883,57
2019	12669334,54	R\$ 6.229.255.420,47
2020	10999383,04	R\$ 5.402.495.684,19

Fonte: Autor, 2021.

Tabela A5. Consumo e Receita de energia para região sul.

<b>Ano</b>	<b>Consumo de Energia Elétrica (MWh)</b>	<b>Receita de Fornecimento de Energia Elétrica (Reais)</b>
1996	15694276,00	R\$ 971.335.530,00
1997	18560379,00	R\$ 1.240.962.993,00
1998	17301501,00	R\$ 1.165.595.475,00
1999	18279871,00	R\$ 1.326.996.700,00
2000	20231667,00	R\$ 1.633.696.122,00
2001	20896734,00	R\$ 1.934.670.492,00
2002	21689905,00	R\$ 2.322.954.704,00
2003	20091057,21	R\$ 2.460.231.101,91
2004	20560961,18	R\$ 3.202.486.267,32
2005	19316844,21	R\$ 3.341.787.816,95
2006	17897893,11	R\$ 3.487.020.524,71
2007	18072190,30	R\$ 3.726.919.954,86
2008	19487949,40	R\$ 4.037.702.873,24
2009	19327724,46	R\$ 4.160.157.817,93
2010	20354823,12	R\$ 4.652.600.377,53
2011	19975382,23	R\$ 4.914.545.507,20
2012	19072953,96	R\$ 4.919.857.230,79
2013	17717194,06	R\$ 3.820.987.334,53
2014	17984123,43	R\$ 4.458.672.588,61
2015	17323540,89	R\$ 6.845.921.272,52
2016	14022372,33	R\$ 5.625.540.348,09
2017	9692872,48	R\$ 3.849.592.495,85
2018	9216025,90	R\$ 4.141.499.750,68
2019	8048865,87	R\$ 3.808.073.872,69
2020	7687489,4	R\$ 3.590.288.146,65

Fonte: Autor, 2021.

## APÊNDICE B – CÓDIGOS EM PSEUDOCÓDICO PORTUGOL DO SIMULADOR TÉCNICO E ECONÔMICO

Tabela B1. Declaração de Variáveis função "NET SAVINGS"

<p>Declaração das Constantes Utilizadas na Função</p>	<pre>// Custo de Motores de Baixo Rendimento (IR2)  const real Cibr50=15522.53,Cibr40=14001.12,Cibr30=10473.83, Cibr25=7359.50  const real Cibr20=6330.82, Cibr15=4468.16, Cibr12e5=4186.63, Cibr10=3715.0  const real Cibr7e5=3108.05,Cibr6=2932.12,Cibr5=2125.52, Cibr4=2010.79  const real Cibr3=1578.06,Cibr2=1365.07,Cibr1e5=1120.15,Cibr1=1001.34  // Custo de Motores de Alto Rendimento (IR3)  const real Clar50=18109.14, Clar40=16364.69,Clar30=12957.82,Clar25=9321.29  const real Clar20=8041.94,Clar15=5557.65,Clar12e5=5215.72,Clar10=4642.90  const real Clar7e5=3714.70,Clar6=3509.76,Clar5=2668.01,Clar4=2489.42  const real Clar3=2008.28,Clar2=1745.95,Clar1e5=1385.75,Clar1=1244.52</pre>
<p>Declaração das Entradas e Saídas da Função</p>	<pre>// Variáveis de Entrada  real P  real Pvet  real ER  real T  real VP  // Variáveis de Saída  real ESS // Energy Savings  real NSS // Net Savings  // Demais Variáveis  real Cibr  real Clar  real Iar1  real Iar2</pre>

	<pre> real NS  real ES  logico m1  logico m2  logico mlog  logico mlog2  logico mlog3  logico mlog4  // Fim da Declaração de Variáveis </pre>
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Autor, 2021.

Tabela B2. Estruturas condicionais Função "Net Savings"

<p>Estruturas Condicionais da Função</p>	<pre> funcao inicio() { se (P==50) { CIbr=CIbr50 se (Pvet==P) { m1[62]= {verdadeiro ou Falso, verdadeiro ou falso, verdadeiro ou falso...} m1[62]=m1[62]*P // Encontrar vetor Lógico para potências iguais a potência P } senao se (Pvet&lt;P) { m2[62]= {verdadeiro ou Falso, verdadeiro ou falso, verdadeiro ou falso...} m2[62]=m1[62]*P // Encontrar vetor Lógico para potências menores que a potência P } Iar1=m1*CIar50 Iar2=m2*CIar40 CIar=Iar1+Iar2 } senao se (P==40) { CIbr=CIbr40 se (Pvet==P) { </pre>
--------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<pre> m1[62]= {verdadeiro ou Falso, verdadeiro ou falso, verdadeiro ou falso...}  m1[62]=m1[62]*P          // Encontrar vetor Lógico para potências iguais a potência P }  senao se (Pvet&lt;P) { m2[62]= {verdadeiro ou Falso, verdadeiro ou falso, verdadeiro ou falso...}  m2[62]=m1[62]*P          // Encontrar vetor Lógico para potências menores que a potência P }  Iar1=m1*CIar40 Iar2=m2*CIar30  CIar=Iar1+Iar2 }  senao se (P==30) { CIbr=CIbr30  se (Pvet==P) { m1[62]= {verdadeiro ou Falso, verdadeiro ou falso, verdadeiro ou falso...}  m1[62]=m1[62]*P          // Encontrar vetor Lógico para potências iguais a potência P }  senao se (Pvet&lt;P) { m2[62]= {verdadeiro ou Falso, verdadeiro ou falso, verdadeiro ou falso...}  m2[62]=m1[62]*P          // Encontrar vetor Lógico Para potências menores que a potência P }  Iar1=m1*CIar30 Iar2=m2*CIar25  CIar=Iar1+Iar2 }  // [...]  // Estrutura condicional <b>senao se</b> continua para as potências de 25, 20, 15, 12.5, 10, 7.5, 5, 6, 4, 3, 2, 1.5 e 1cv. </pre>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Autor, 2021.

Tabela B 3. Cálculo do *Net Savings* e do *Energy Saved Cost*.

<p>Cálculo do <i>Net Savings</i> e o <i>Energy Savings</i></p>	<pre>// Cálculo do NET SAVINGS  NS=VP-(CIar-CIbr) // Fórmula para o cálculo do Net Savings  // Matriz Lógica para //NET SAVINGS maiores que 0 - Trocas rentáveis  Se (NS&gt;0)  {  mlog[62]={verdadeiro ou Falso, verdadeiro ou falso, verdadeiro ou falso...}  mlog2=NS*mlog  NSS=mlog2 // Valor final da matriz NET SAVINGS apenas com trocas rentáveis  }  // Cálculo do ENERGY SAVED COST  ES=(CIar-CIbr)/ER  mlog3=ES&lt;=T  mlog4=ES*mlog3  ESS=mlog4 // Valor final da matriz Energy Savings  }  }</pre>
------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Autor, 2021.

Tabela B 4. Variáveis de Entrada e Saída da função "Troca Motor IR2 IR3 Carga".

Declaração das Variáveis de Entrada e Saída da Função	<pre>// Declaração das Variáveis // Variáveis de Entrada real P real e real H real q real d real limite_carr real T</pre>
	<pre>// Variáveis de Saída real NS_soma real ES_rep real n_NS_ok real n_ES_ok real ES_ava real n_Pmenor real Pvet</pre>

Fonte: Autor, 2021.

Tabela B 5. Determinação dos valores mínimos e máximos de carregamento por potência.

Determinação dos valores mínimos e máximos de carregamento por potência	<pre>funcao inicio() {   escolha (P&gt;=1)   {     caso P &gt;=50:       ma=73       me=54       t=15     pare     caso P &gt;= 15 e P &lt; 50:       ma=64</pre>
-------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<pre> me=54  t=15  pare  caso P &gt;= 10 e P &lt; 15:  ma=64  me=54  t=12  pare  caso P &gt; 1.5 e P &lt; 10:  ma=62  me=40  t=12  pare  caso contrario:  ma=62  me=40  t=10  } </pre>
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Autor, 2021

Tabela B 6. Cálculo da diferença entre os custos de energia e o Valor Presente.

Cálculo dos Custos e Parâmetros	<pre> //-----Cálculo dos Custos-----  // Diferença entre os custos de Energia CER=((L/rendIR2)*P)-((Lnovo./rendIR3)*Pvet))*(cv2kW*T*H)  // Cálculo do Valor Presente (VP)  VP==0  para (inteiro i=1; i&lt;=t; i++) { VP=VP+(CER*((1+e)/(1+d))^(i)); } </pre>
---------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Autor, 2021.

Tabela B 7. Cálculo da Melhora no consumo e testes da energia economizada.

<p>Cálculo dos Custos e Parâmetros</p>	<pre> // Melhora no consumo de energia devido a nova opção FRC=(((1+e)/(d-e))*(1-((1+e)/(1+d))^t)) ER=CER*FRC  // Teste necessário pois podem haver trocas em que não haja energia economizada se (n_ES_ok &lt;&gt; 0) { ES_rep=(sum(ESS)/n_ES_ok) // Somatório dos Energy Savings } senao se { ES_rep=0 } ES_ava=(ES_rep/T) m1=Pvet&lt;&gt;P n_Pmenor=sum(m1) } } </pre>
----------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Autor, 2021

**APÊNDICE C - NS VIÁVEL EM RELAÇÃO A DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA PARA OS VALORES VARIÁVEIS DE LIMITE DO NOVO CARREGAMENTO E POR REGIÃO.**

Figura C1. NS viável em relação a distribuição de frequência para os valores de limite do novo carregamento de 0,80 para região nordeste.

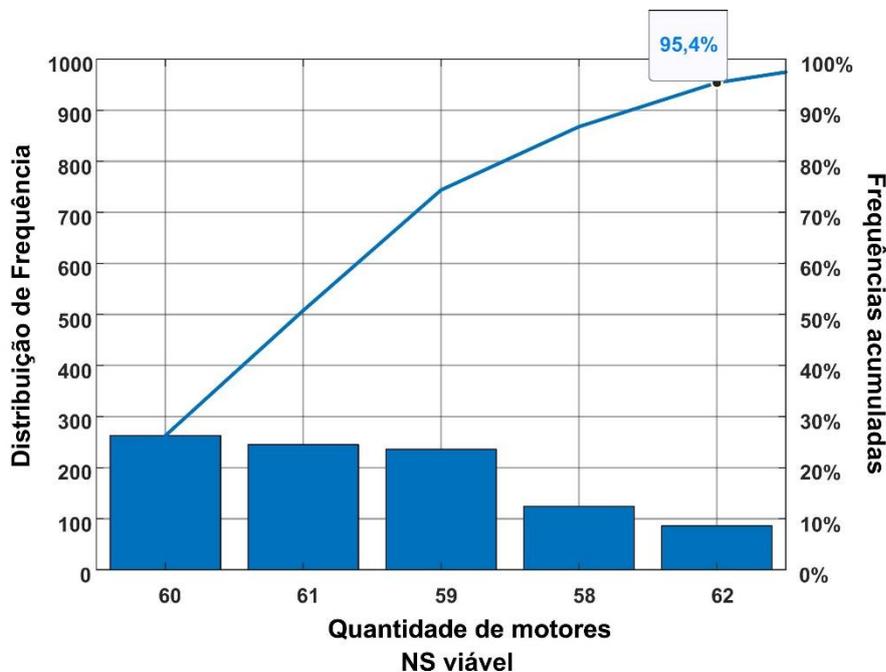


Figura C2. NS viável em relação a distribuição de frequência para os valores os valores de limite do novo carregamento de 0,85 para região nordeste.

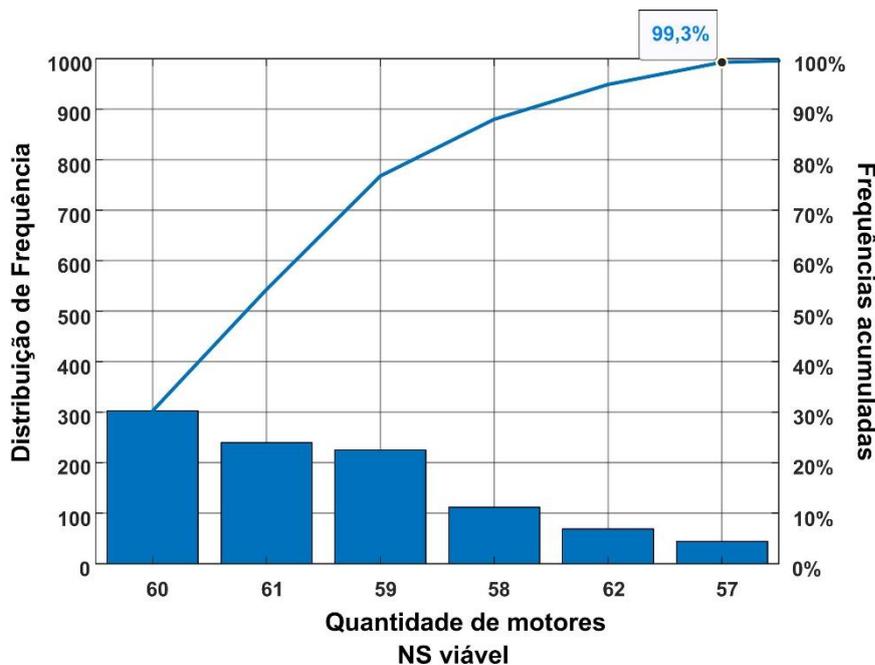


Figura C 3. NS viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,90 para região nordeste.

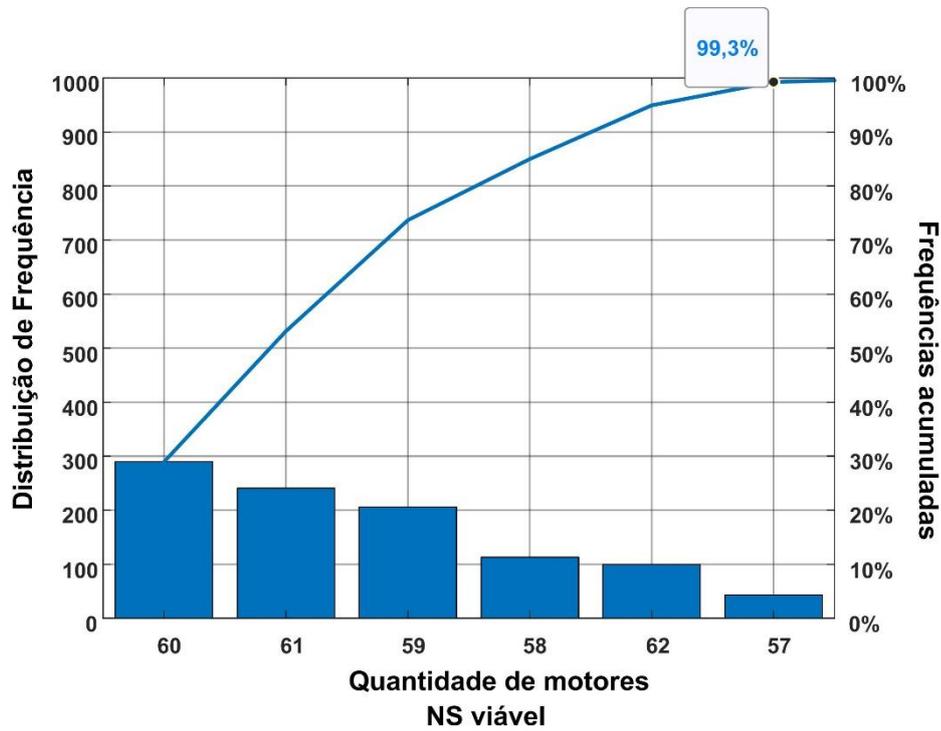


Figura C4. NS viável em relação a distribuição de frequência para os valores de limite do novo carregamento de 0,80 para região centro-oeste.

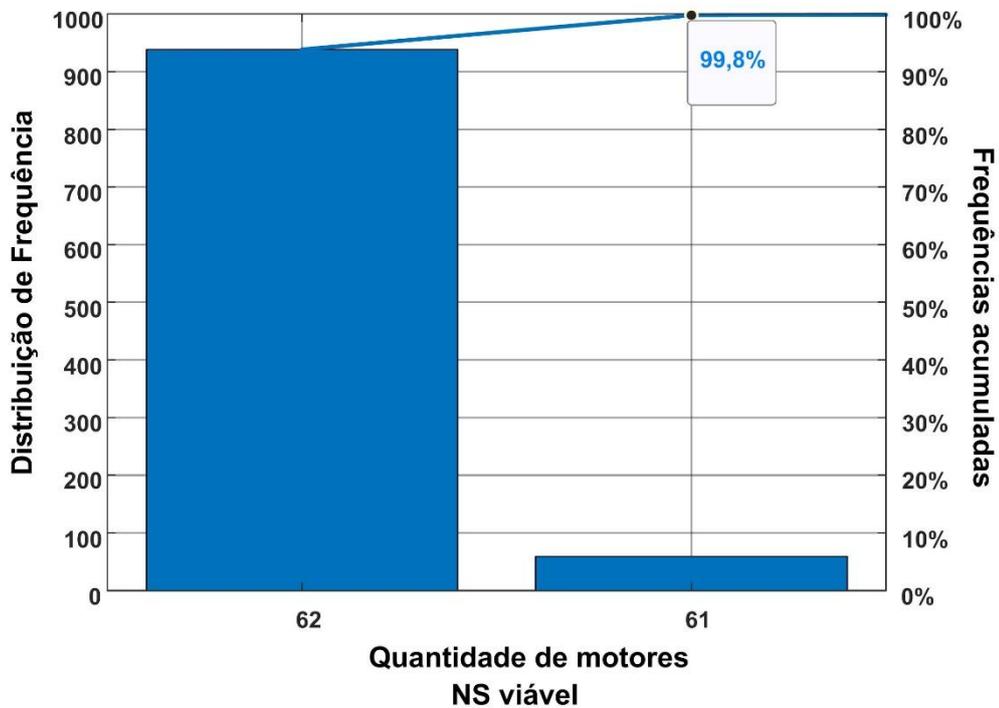


Figura C 5. NS viável em relação a distribuição de frequência para os valores de limite do novo carregamento de 0,85 para região centro-oeste.

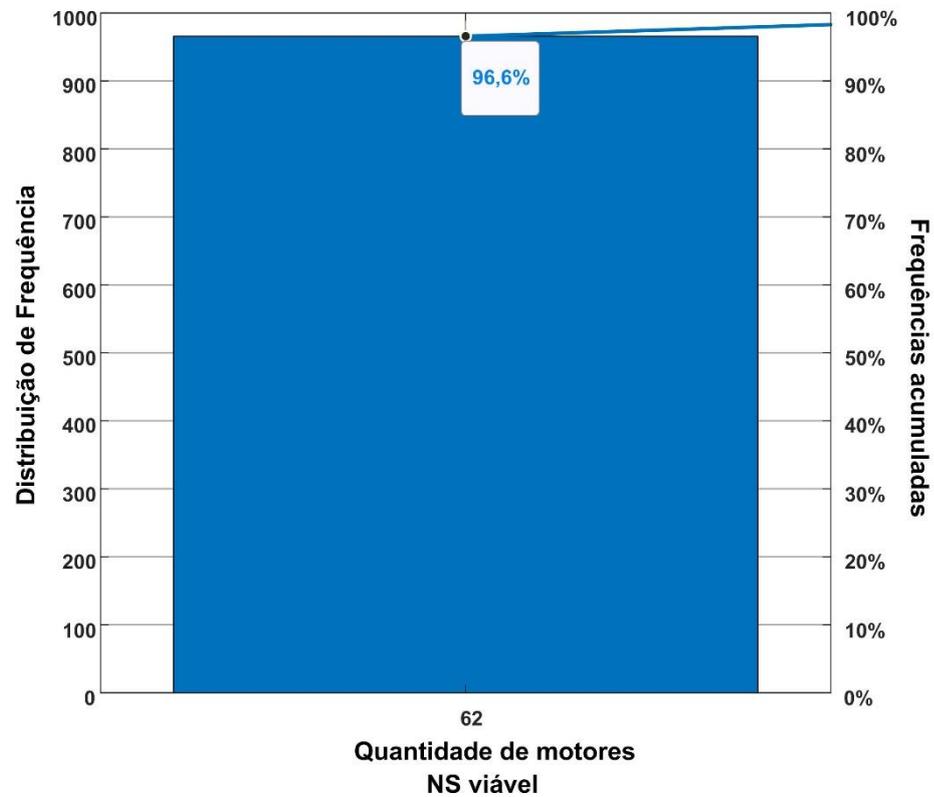


Figura C 6. NS viável em relação a distribuição de frequência para os valores de limite do novo carregamento de 0,90 para região centro-oeste.

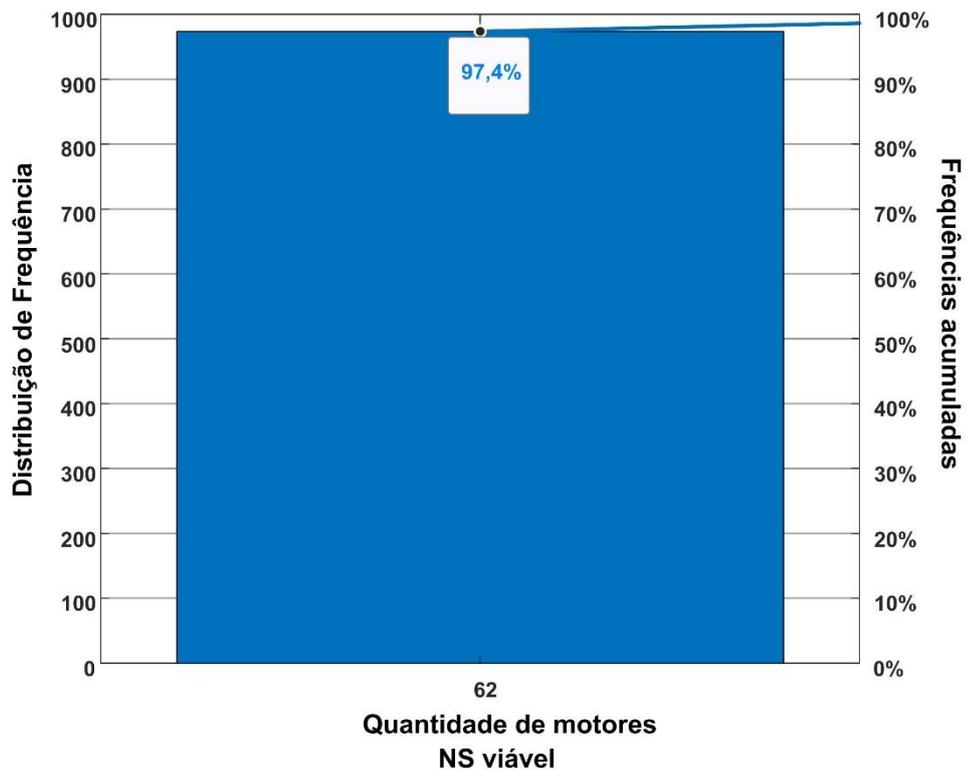


Figura C 7. NS viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,75 para região sudeste.

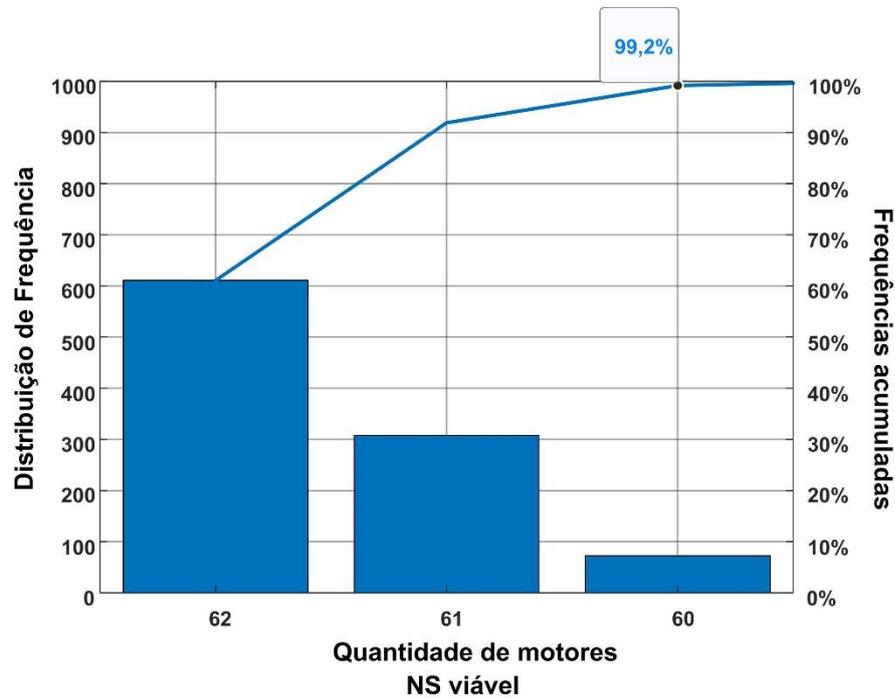


Figura C 8. NS viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,80 para região sudeste.

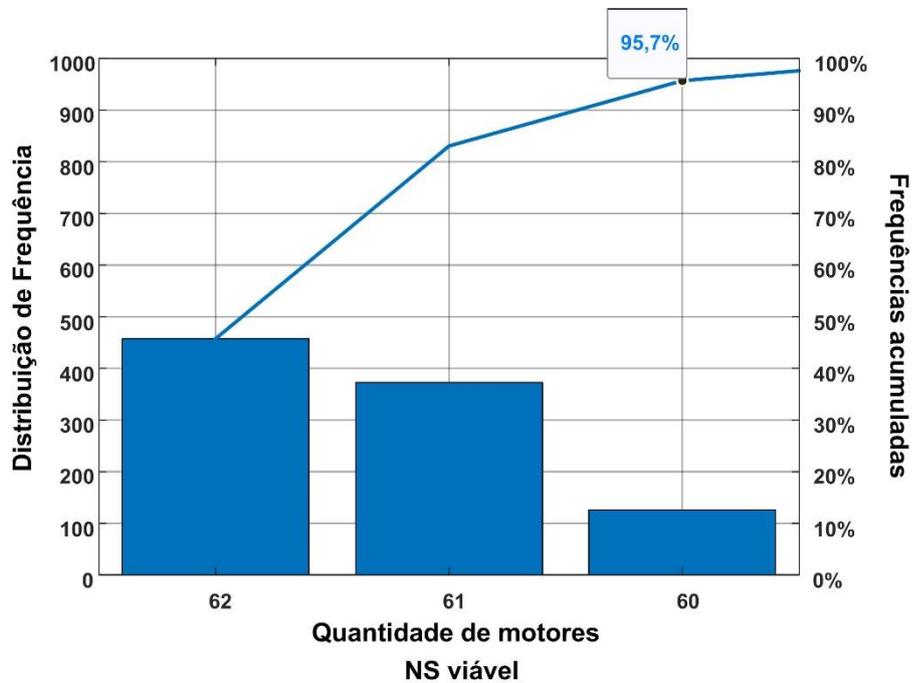


Figura C 9. NS viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,85 para região sudeste.

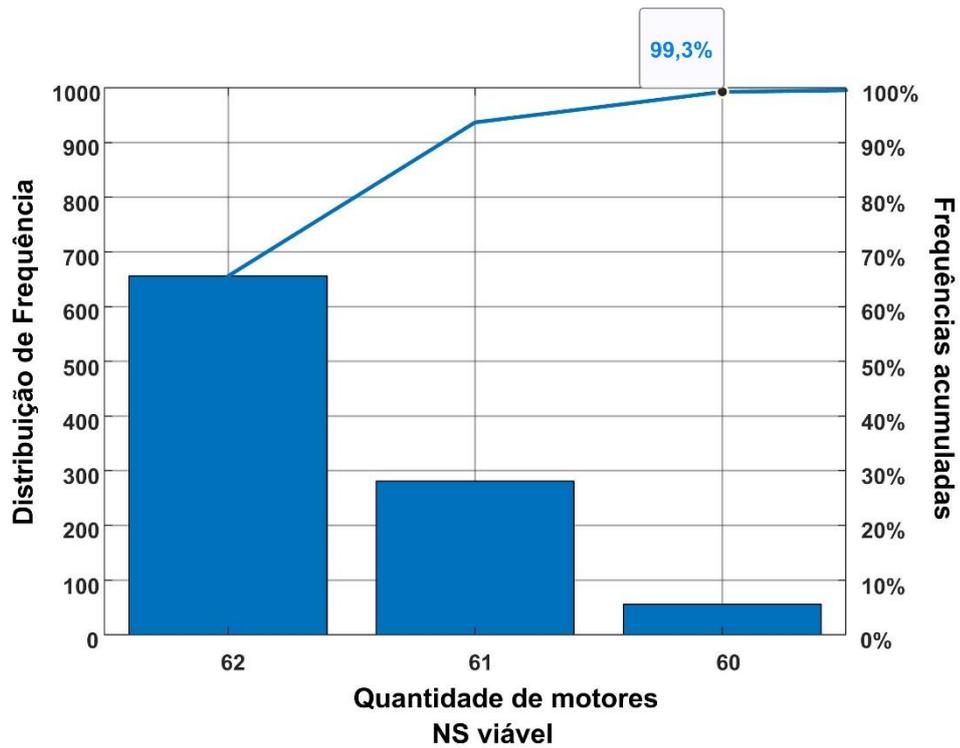
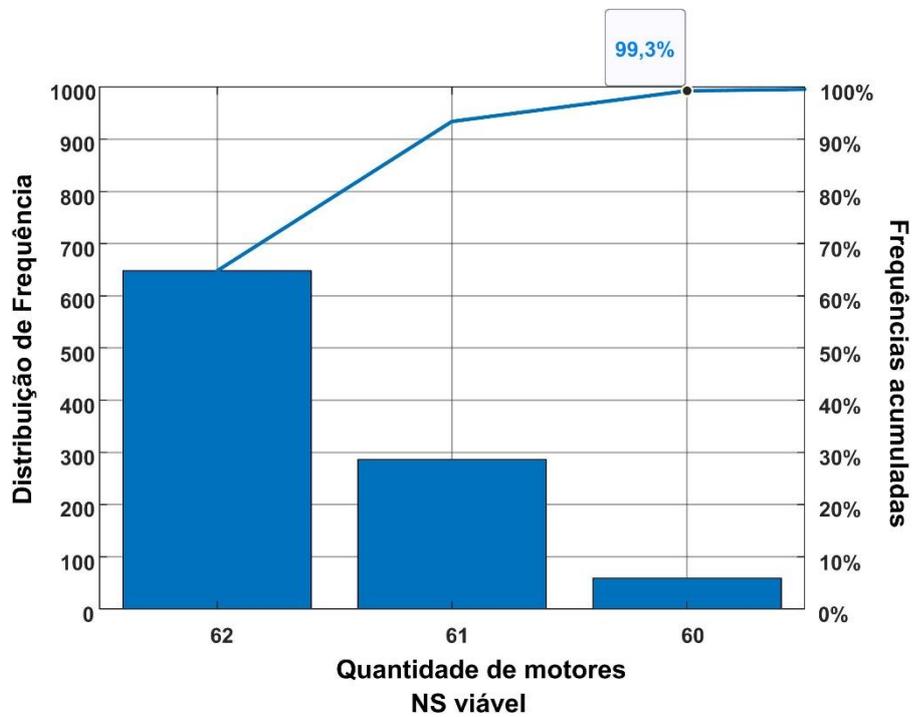


Figura C 10. NS viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,90 para região sudeste.



**APÊNDICE D - ES VIÁVEL EM RELAÇÃO A DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA PARA OS VALORES VARIÁVEIS DE LIMITE DO NOVO CARREGAMENTO E POR REGIÃO.**

Figura D 1. *ES* viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,75 para região nordeste.

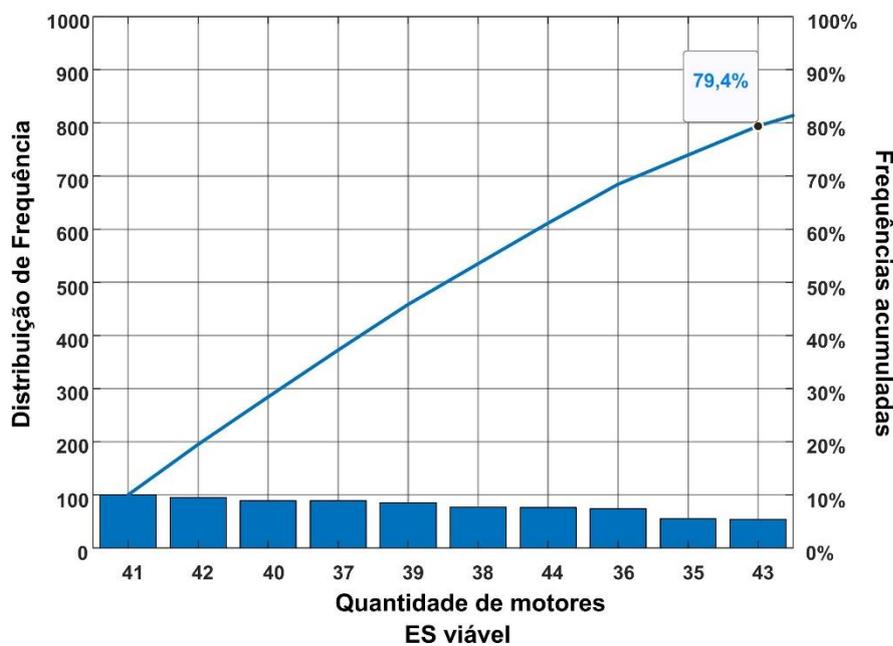


Figura D 2. *ES* viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,80 para região nordeste.

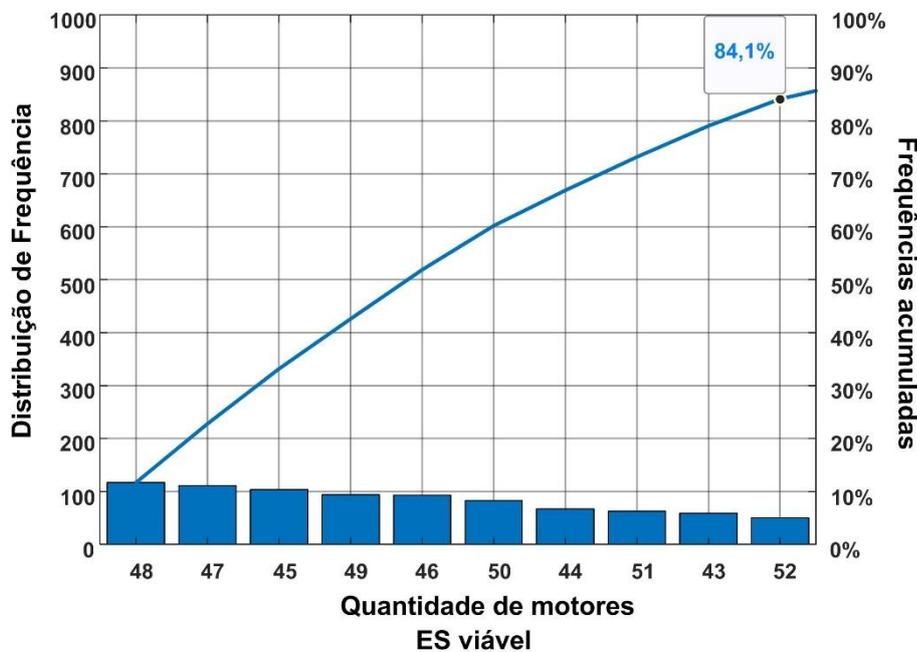


Figura D 3. ES viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento 0,85 para região nordeste.

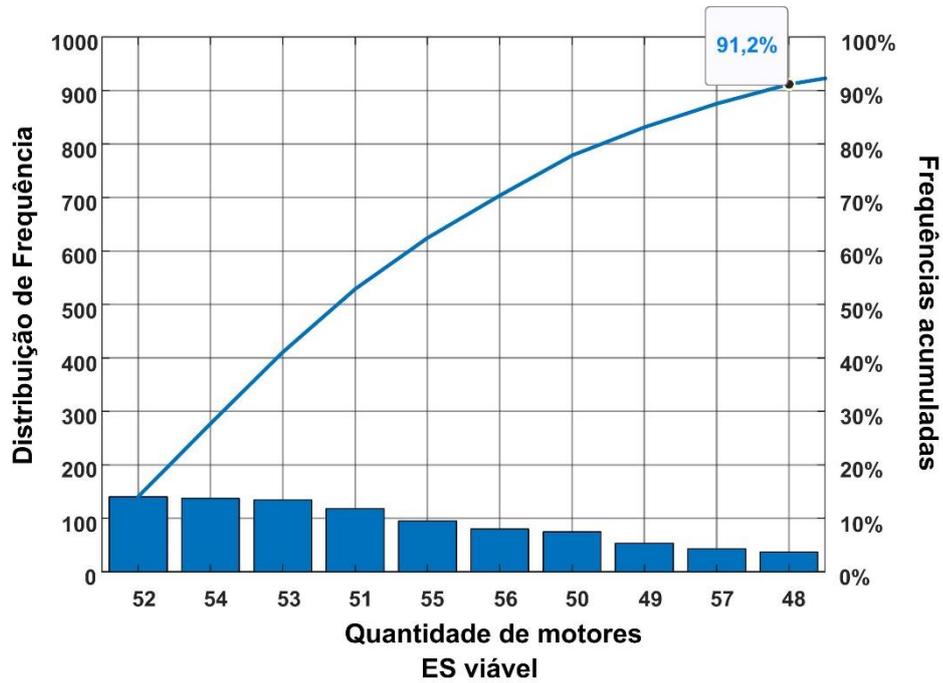


Figura D 4. ES viável em relação a distribuição de frequência para os valores de carregamento de 0,90 para região nordeste.

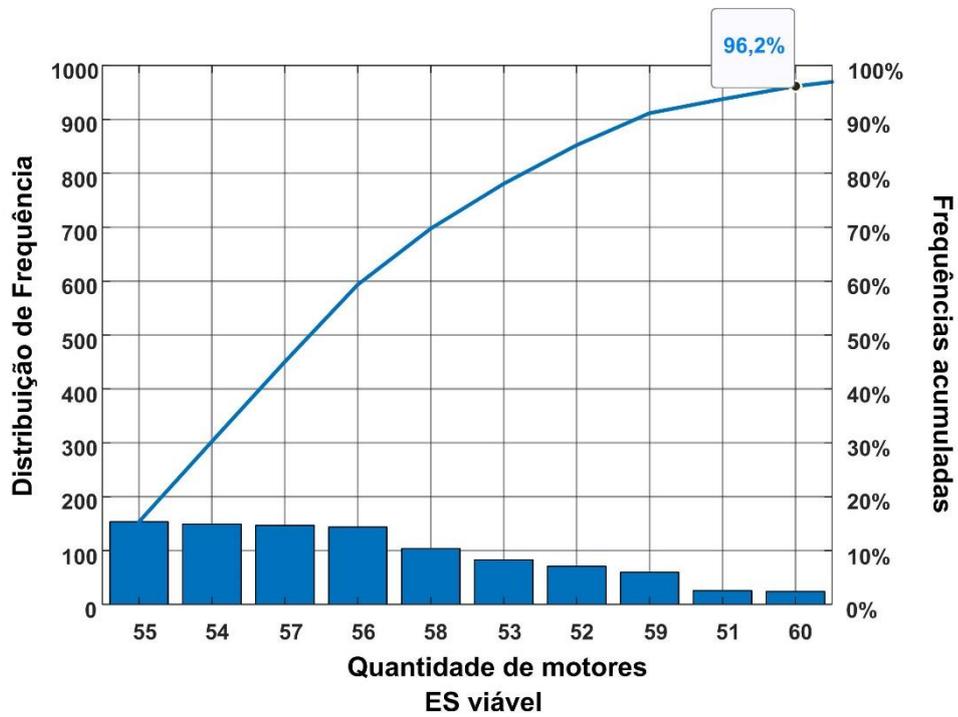


Figura D 5. ES viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,75 para região sudeste.

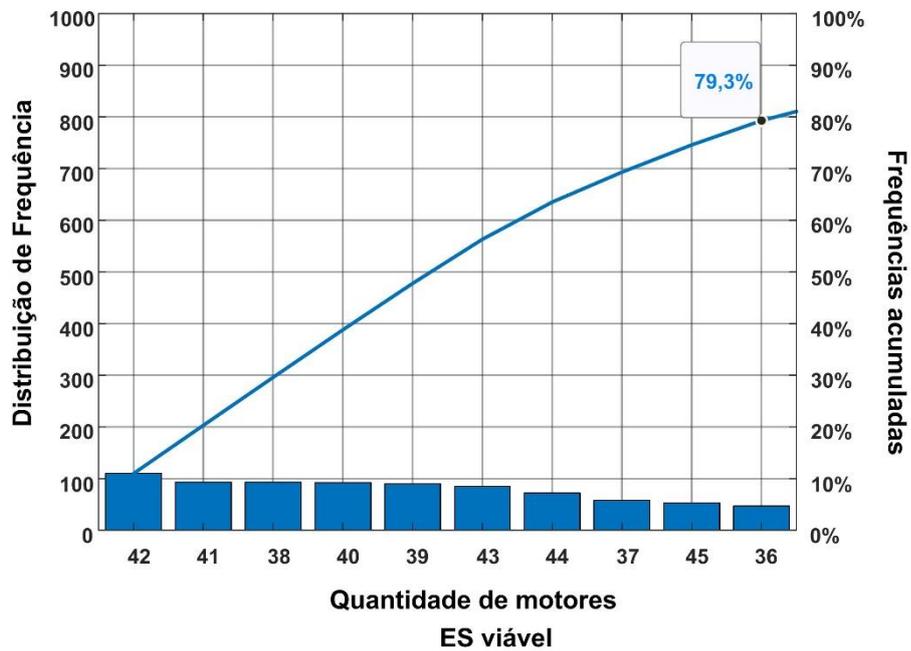


Figura D 6. ES viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,80 para região sudeste.

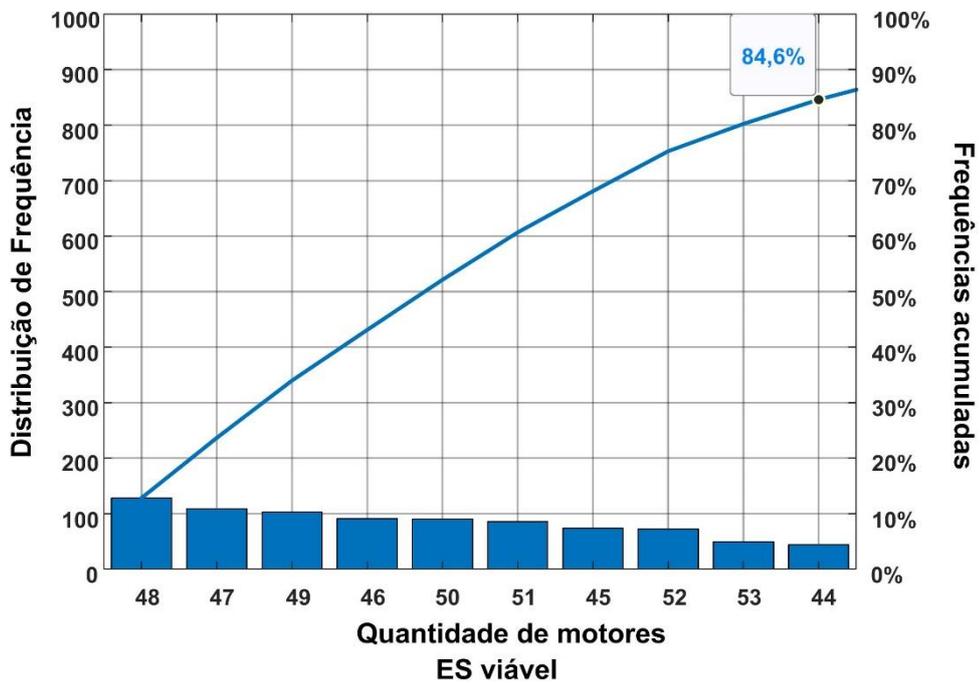


Figura D 7. ES viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,85 para região sudeste.

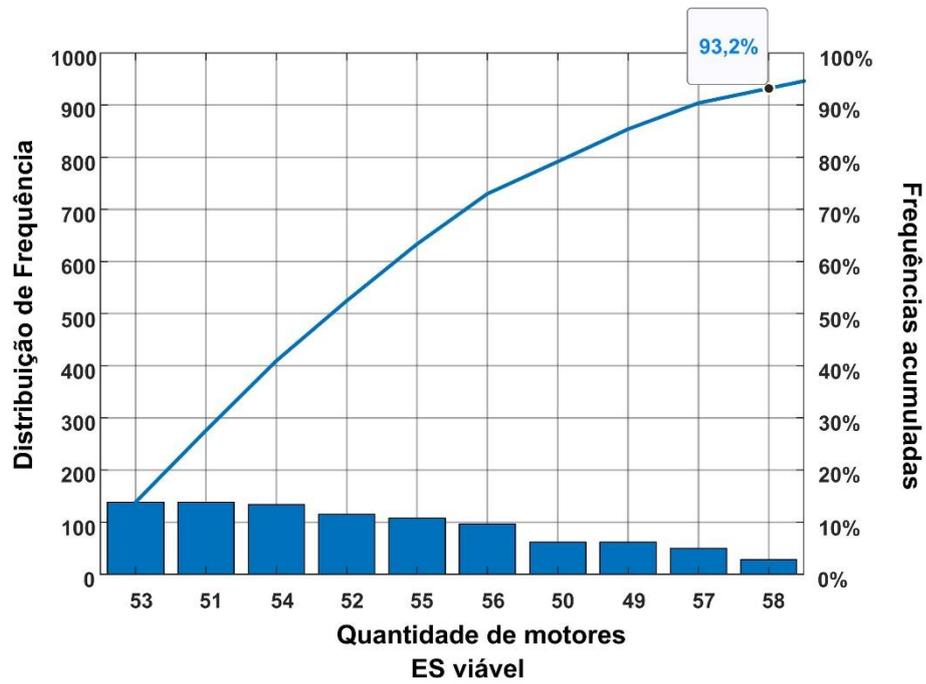


Figura D 8. ES viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,90 para região sudeste.

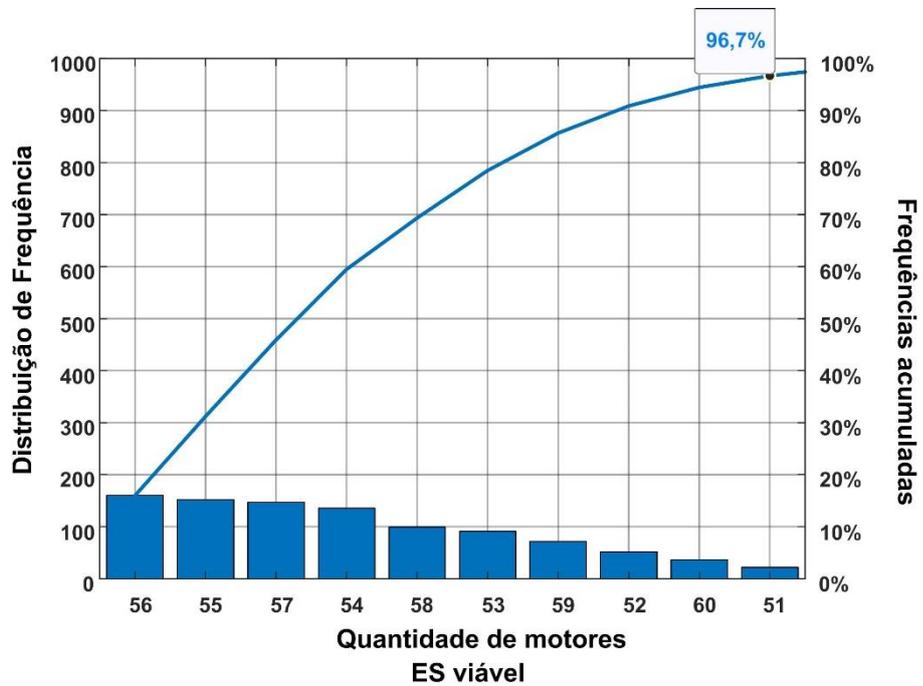


Figura D 9. ES viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,80 para região centro-oeste.

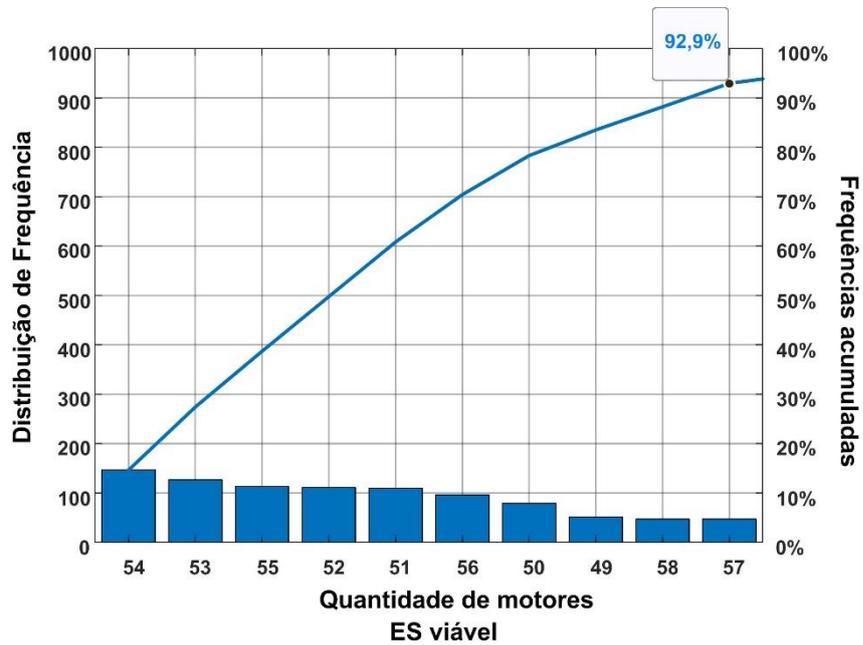


Figura D 10. ES viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,85 para região centro-oeste.

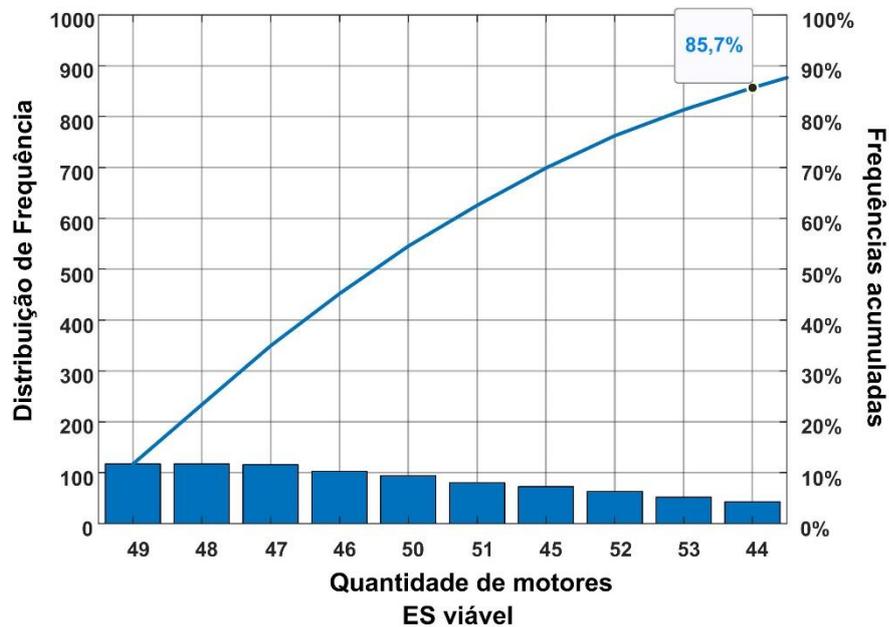
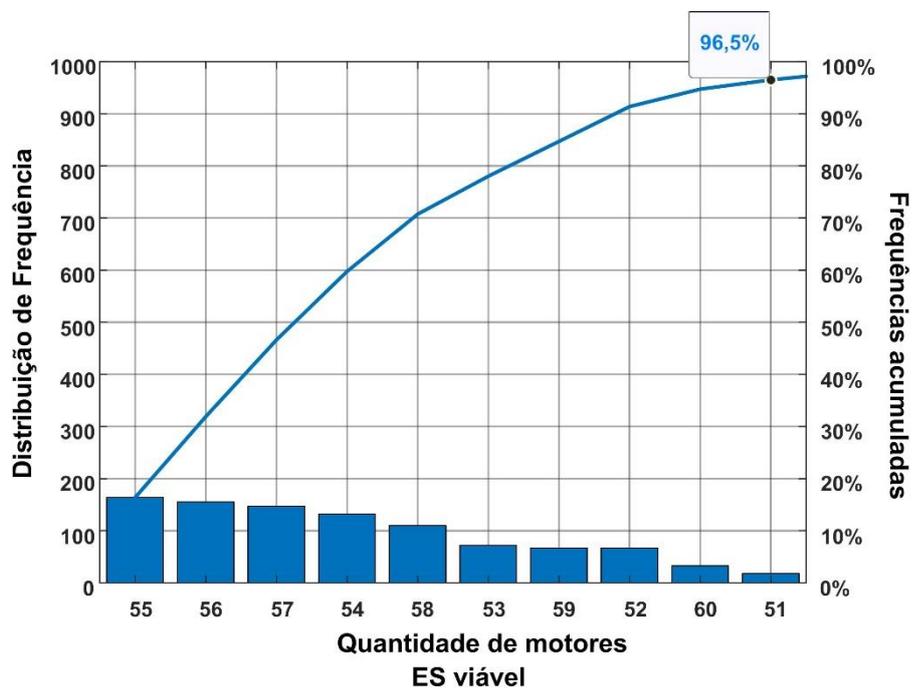


Tabela 11. ES viável em relação a distribuição de frequência para valores de limite do novo carregamento de 0,90 para região centro-oeste.



## APÊNDICE E - QUANTIDADE DE MOTORES SUBSTITUÍDOS COM POTÊNCIA NOMINAL REDUZIDA

Figura E 1. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para valores de limite do novo carregamento de 0,75 na região nordeste.

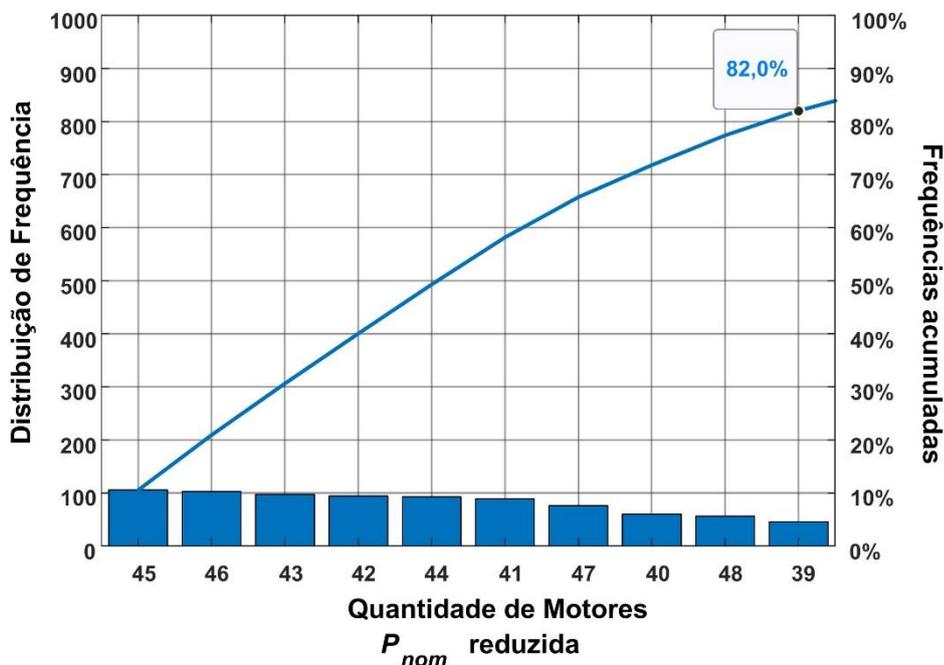


Tabela E 2. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida valores de limite do novo carregamento de 0,80 na região nordeste.

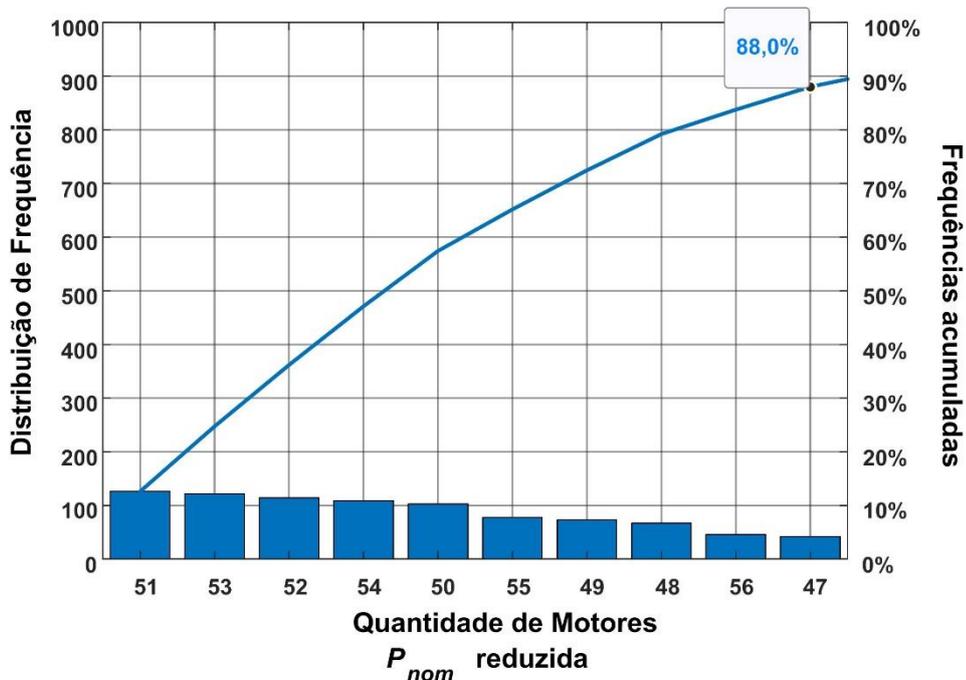


Figura E 3. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para valores de limite do novo carregamento de 0,85 na região nordeste.

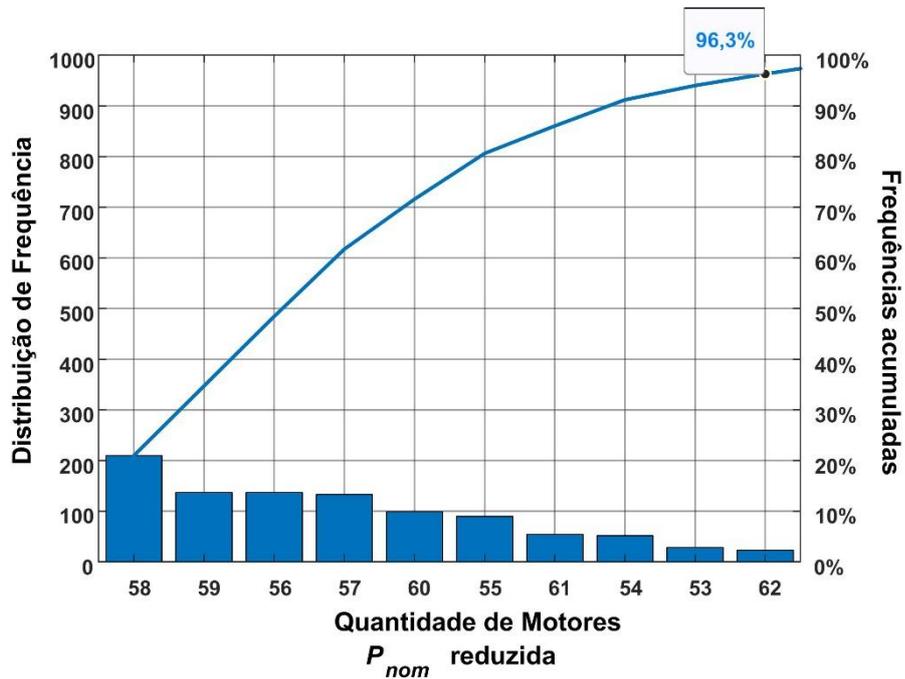


Figura E 4. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para valores de limite do novo carregamento de 0,90 na região nordeste.

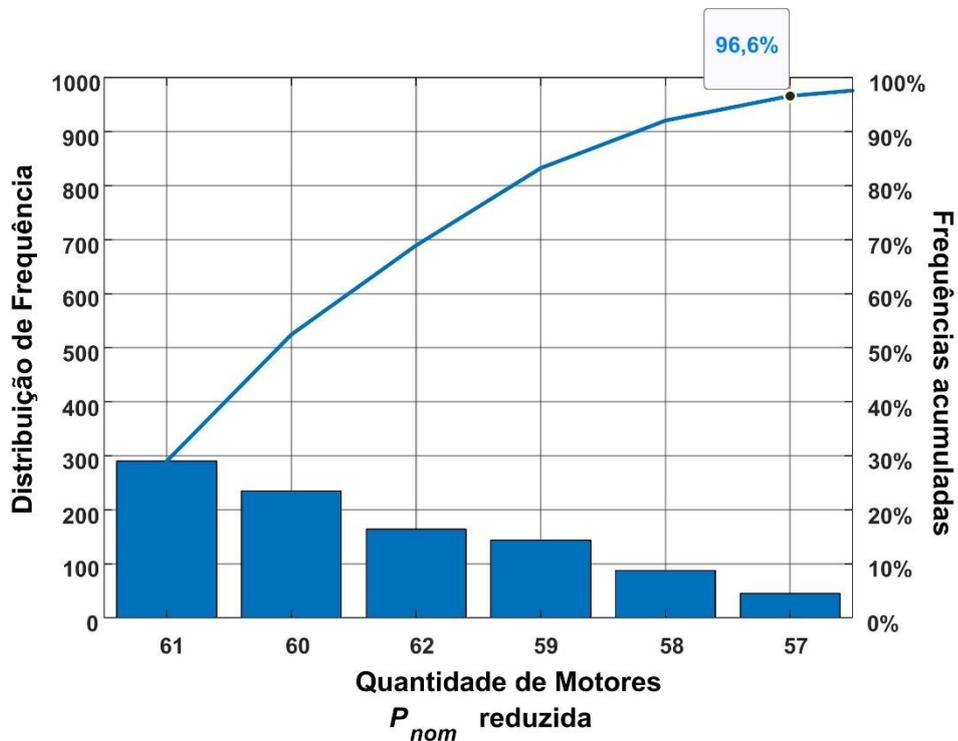


Figura E 5. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para valores de limite do novo carregamento de 0,75 na região sudeste.

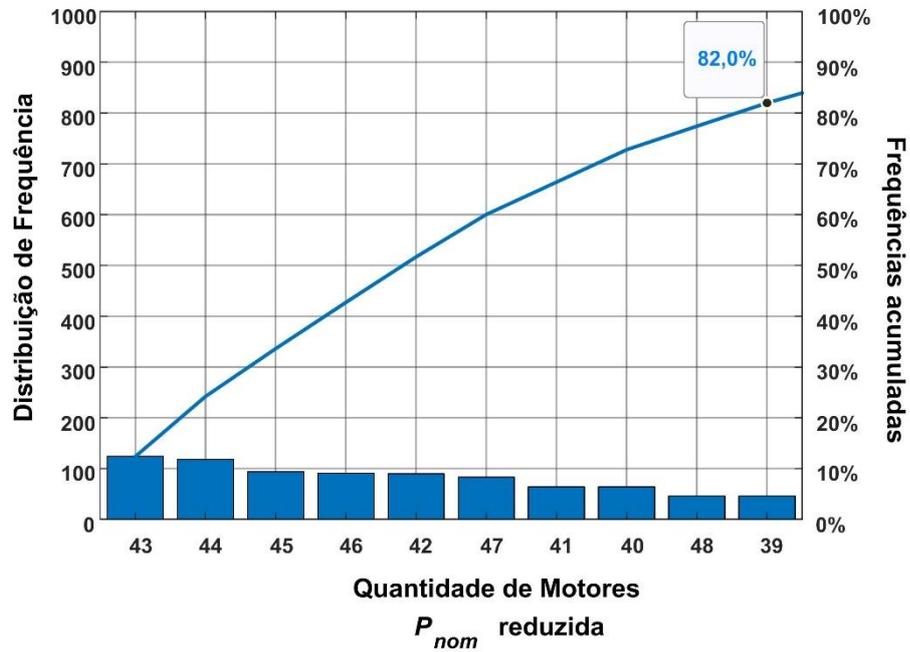


Figura E 6. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida valores de limite do novo carregamento de 0,80 na região sudeste.

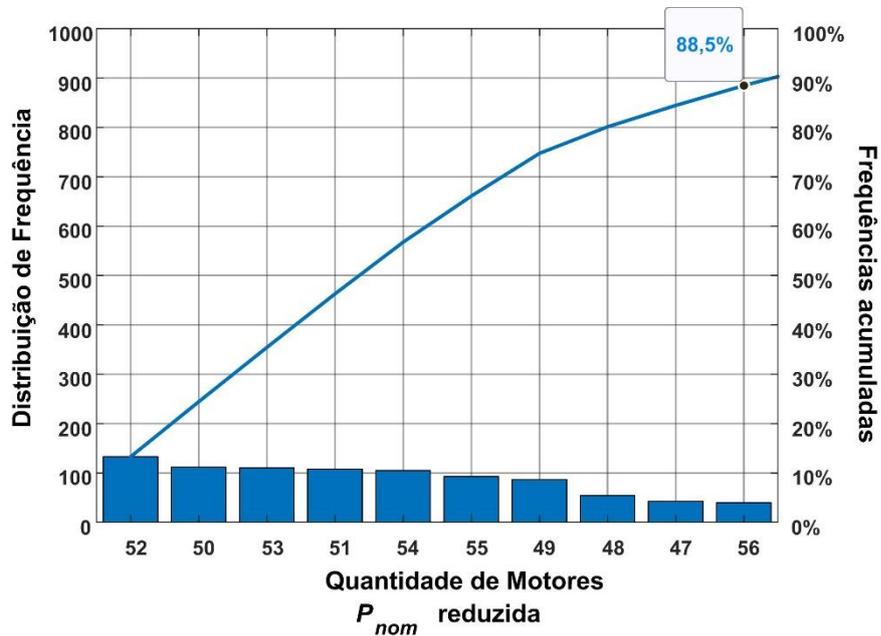


Figura E 7. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para valores de limite do novo carregamento de 0,85 na região sudeste.

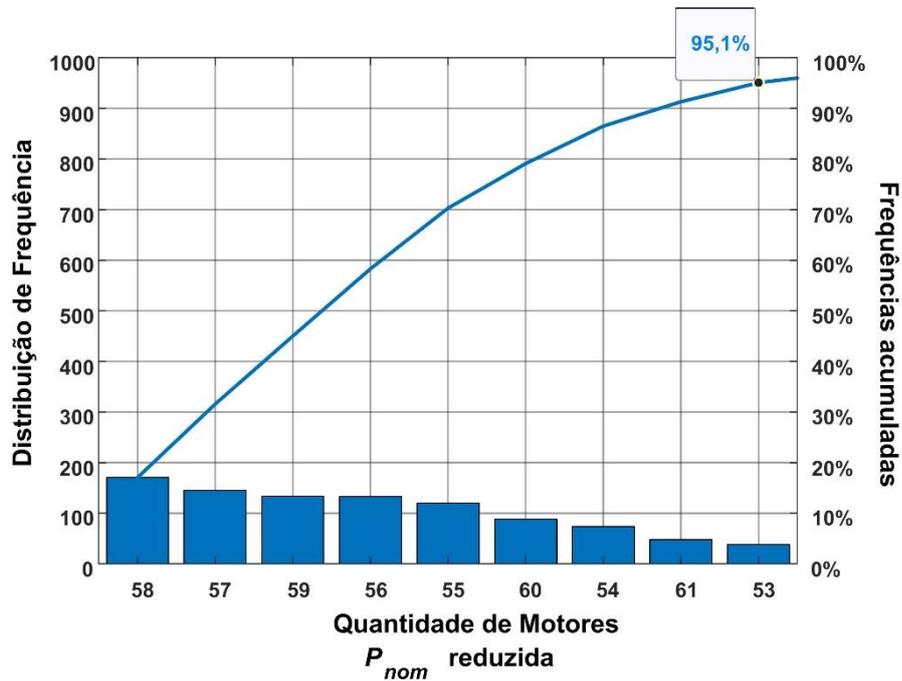


Figura E 8. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para valores de limite do novo carregamento de 0,90 na região sudeste.

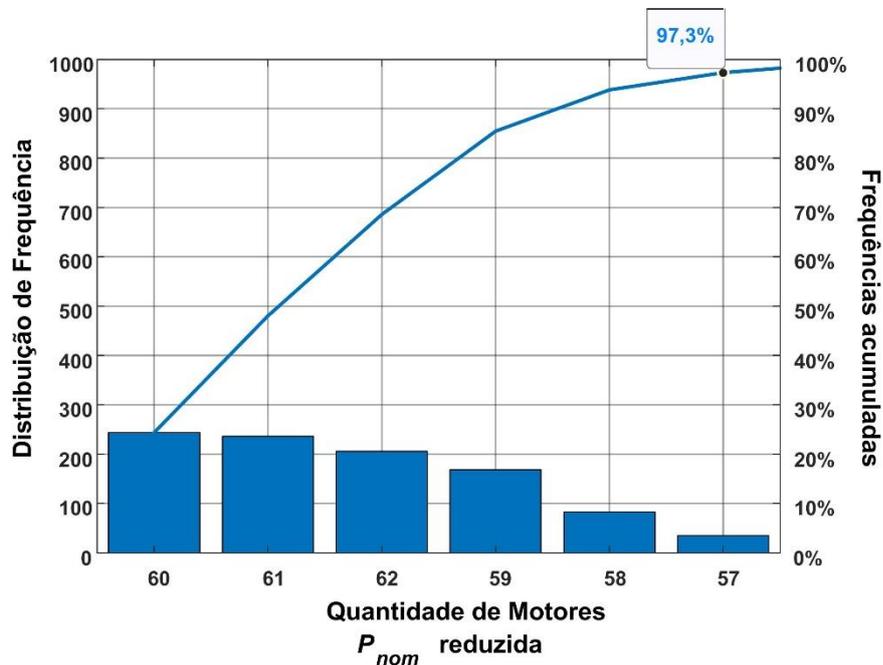


Figura E 9. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para valores de limite do novo carregamento de 0,80 na região centro-oeste.

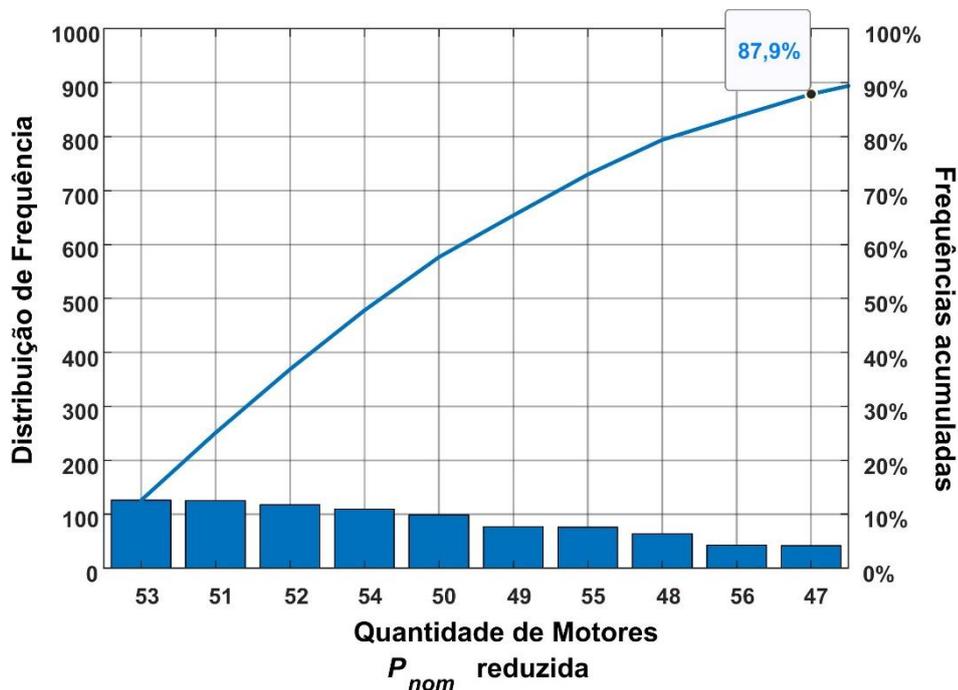


Figura E10. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida para valores de limite do novo carregamento de 0,85 na região centro-oeste.

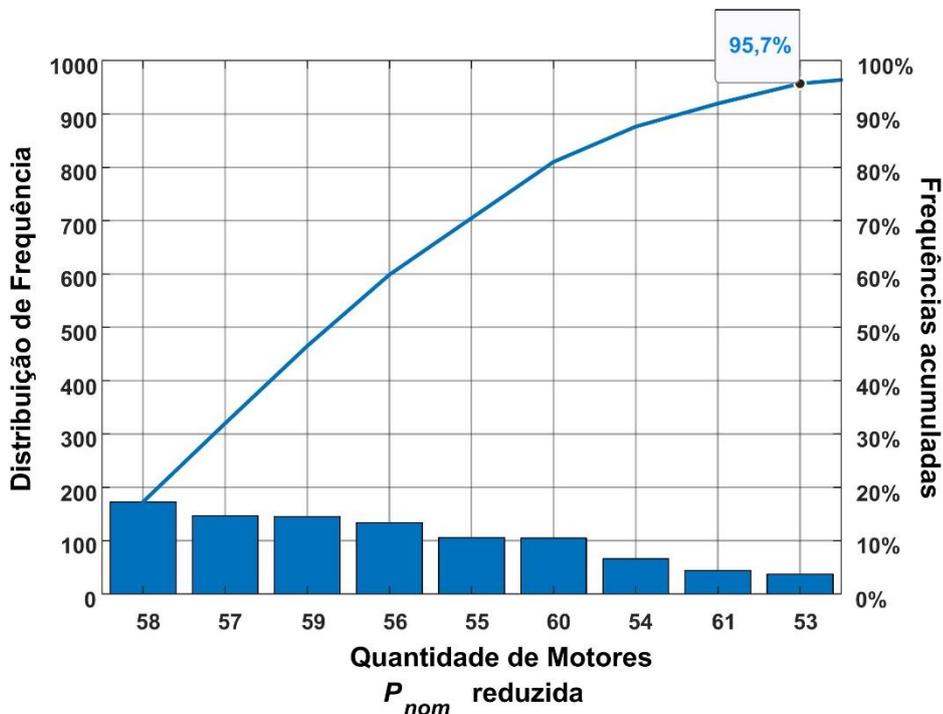
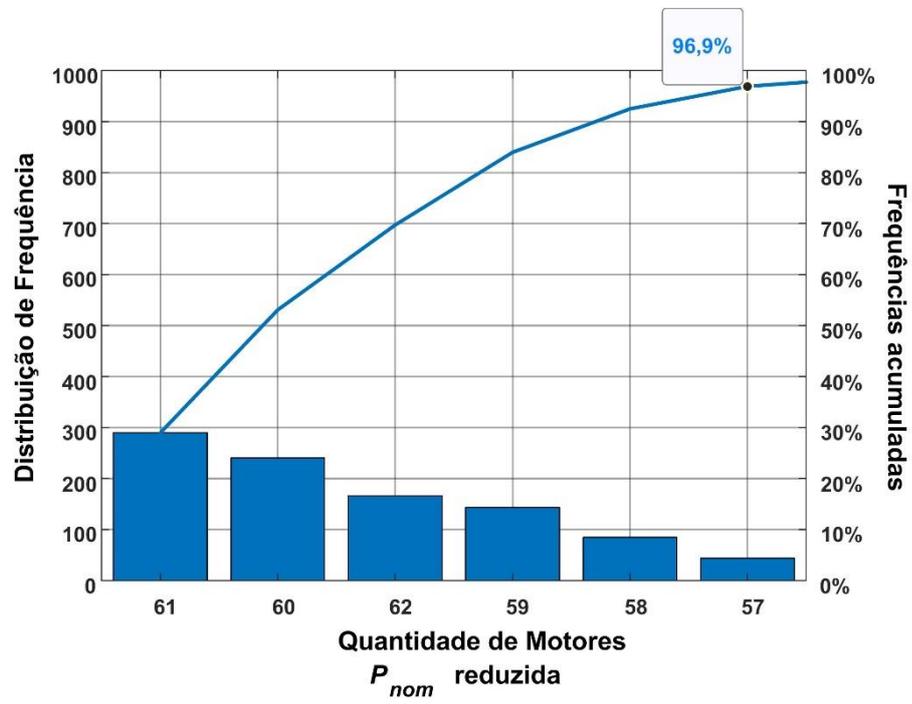


Figura E 11. Motores substitutos (IR3) que possuem potência nominal reduzida valores de limite do novo carregamento de 0,90 na região centro-oeste.



## APÊNDICE F - NET SAVINGS EM FUNÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA PARA VALORES VARIÁVEIS DO LIMITE DE NOVO CARREGAMENTO POR REGIÃO.

Figura F 1. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade para o valor limite de novo carregamento de 0,80 na região nordeste.

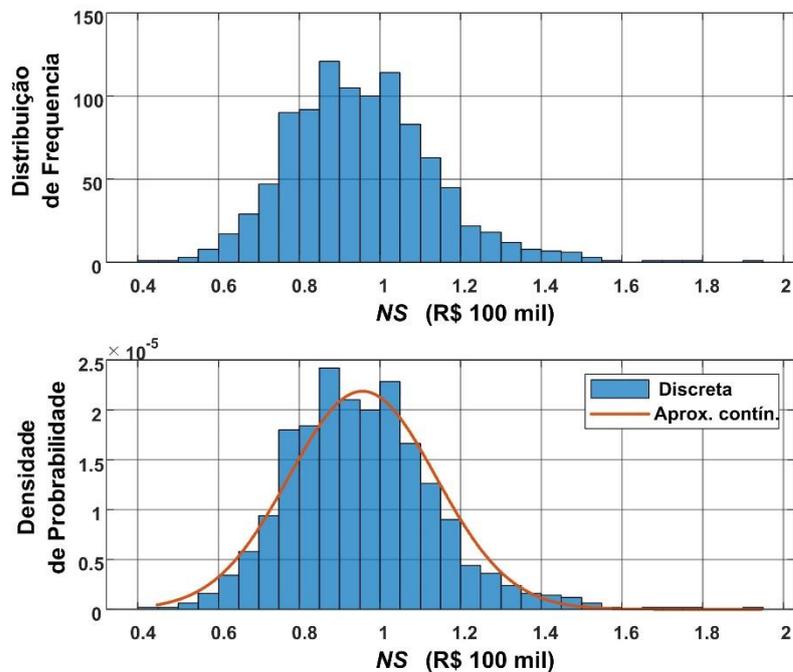


Figura F 2. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade para valor limite de novo carregamento de 0,85 na região Nordeste.

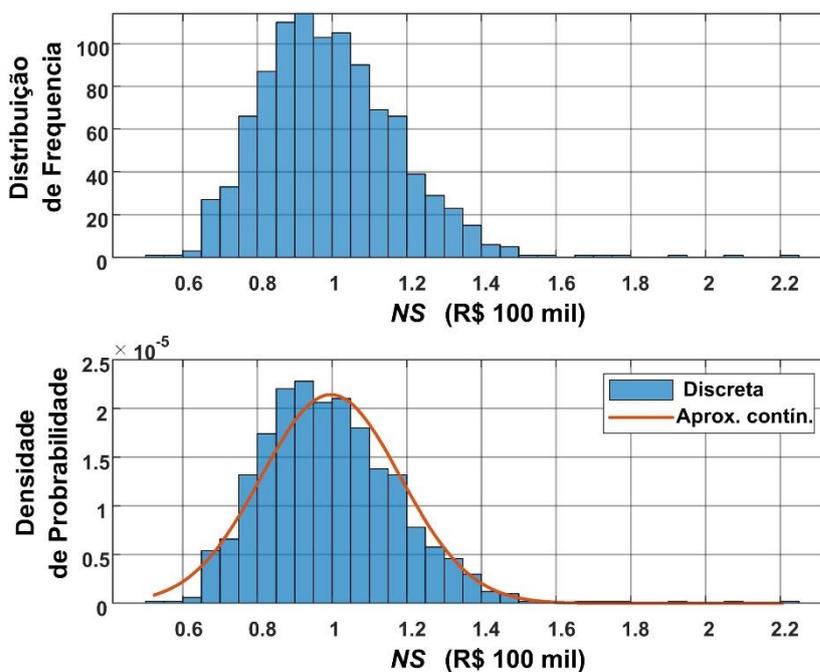


Figura F 3. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade para valor limite de novo carregamento de 0,90 na região Nordeste.

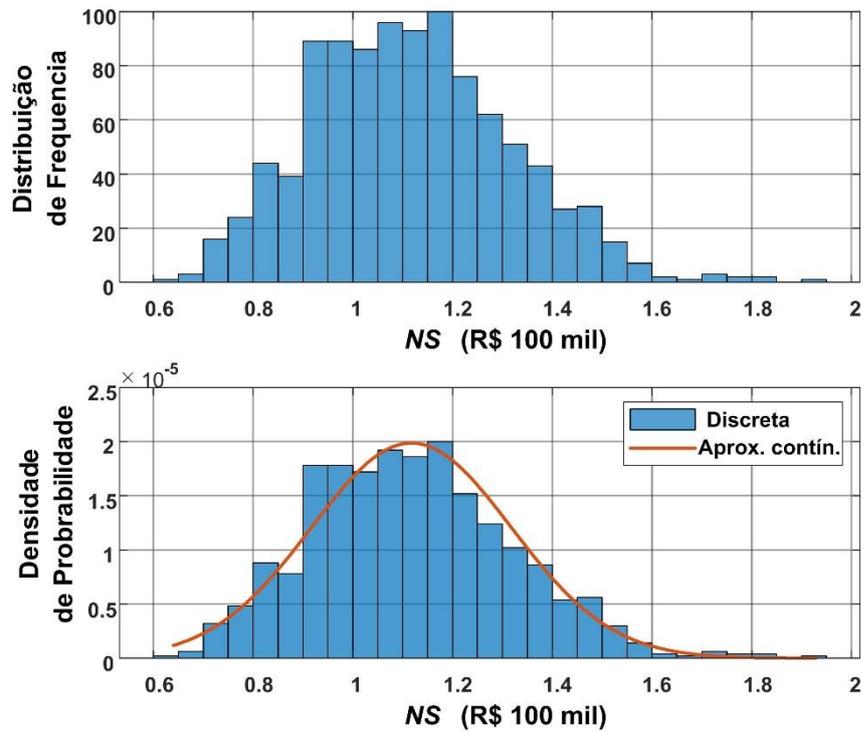


Figura F 4. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade para valor limite de novo carregamento de 0,80 na região sudeste.

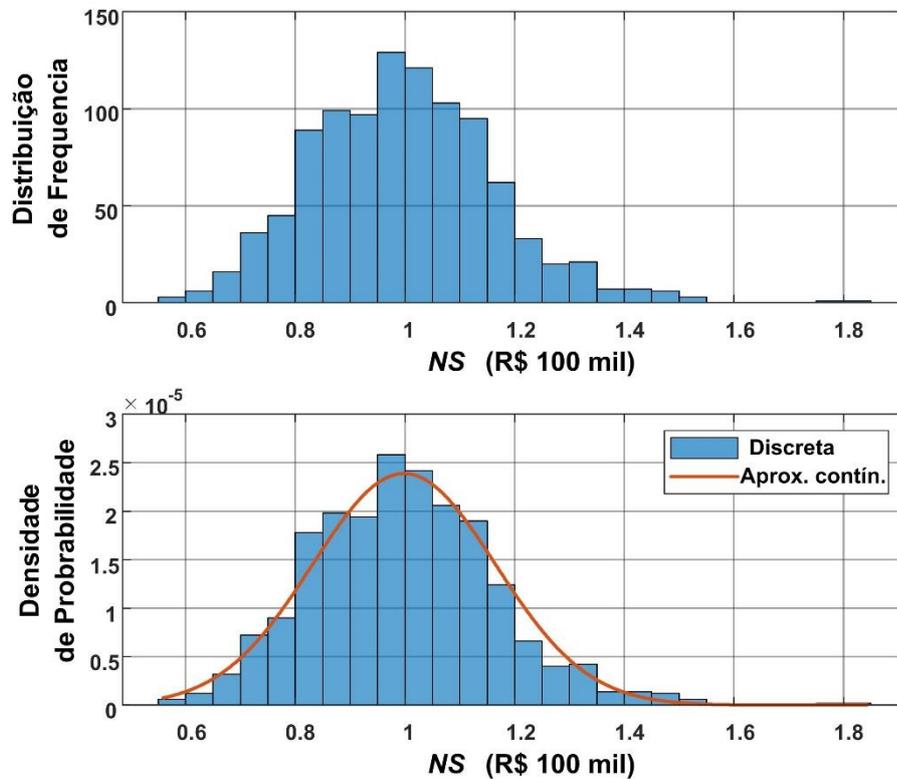


Figura F 5. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade valor limite de novo carregamento de 0,85 na região sudeste.

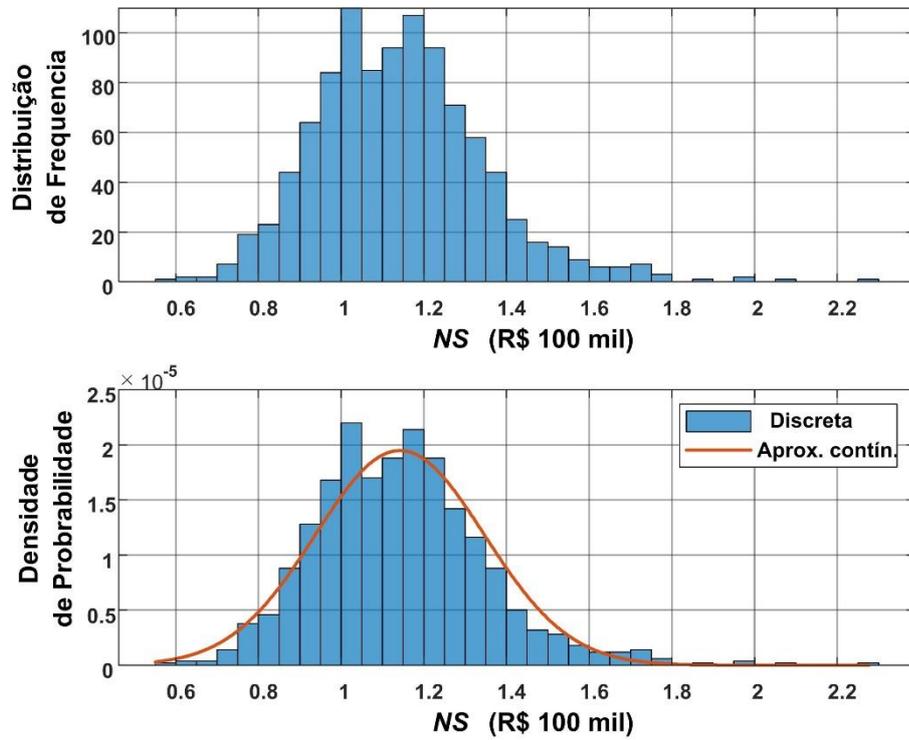


Figura F 6. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade para valor limite de novo carregamento de 0,90 na região sudeste.

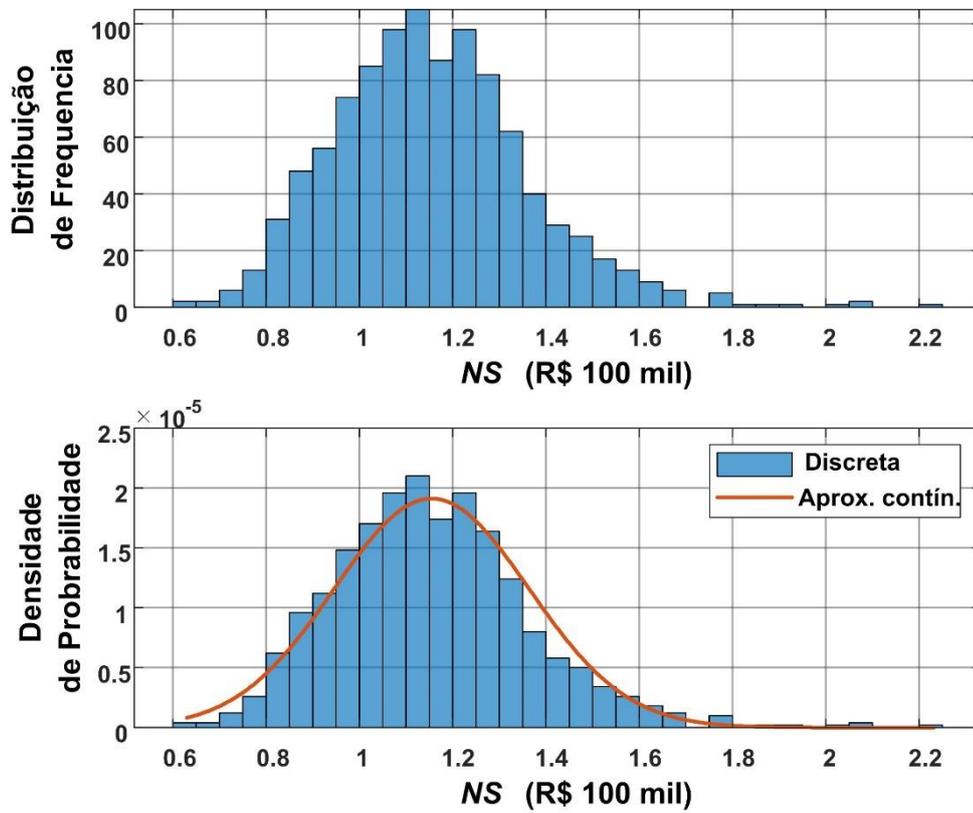


Figura F 7. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade para valor limite de novo carregamento de 0,80 na região centro-oeste.

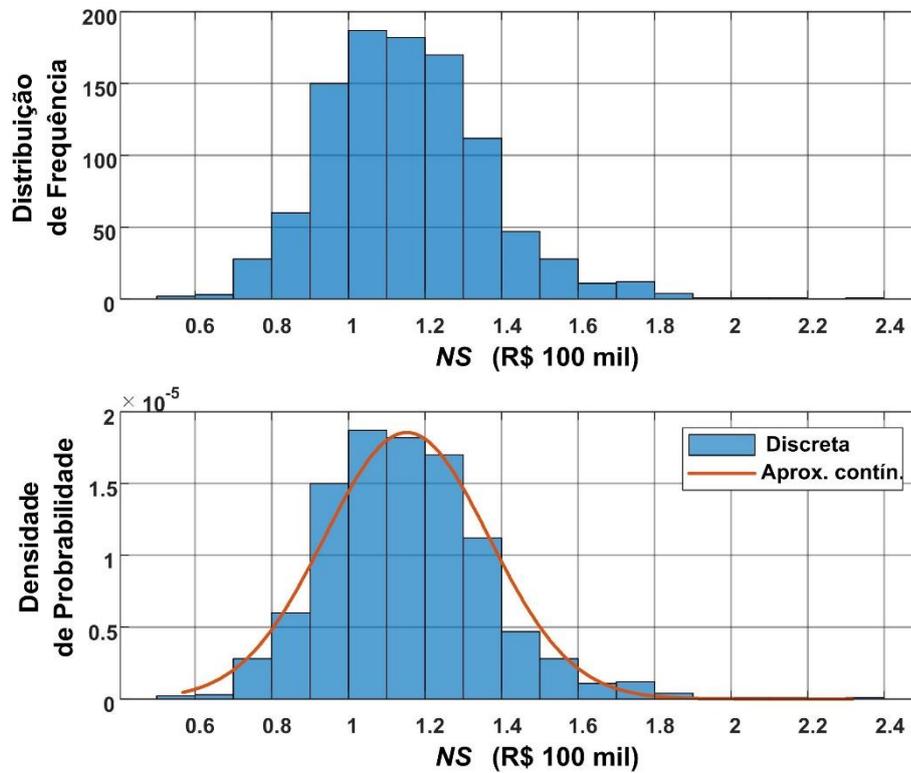


Figura F 8. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade para valor limite de novo carregamento de 0,85 na região centro-oeste.

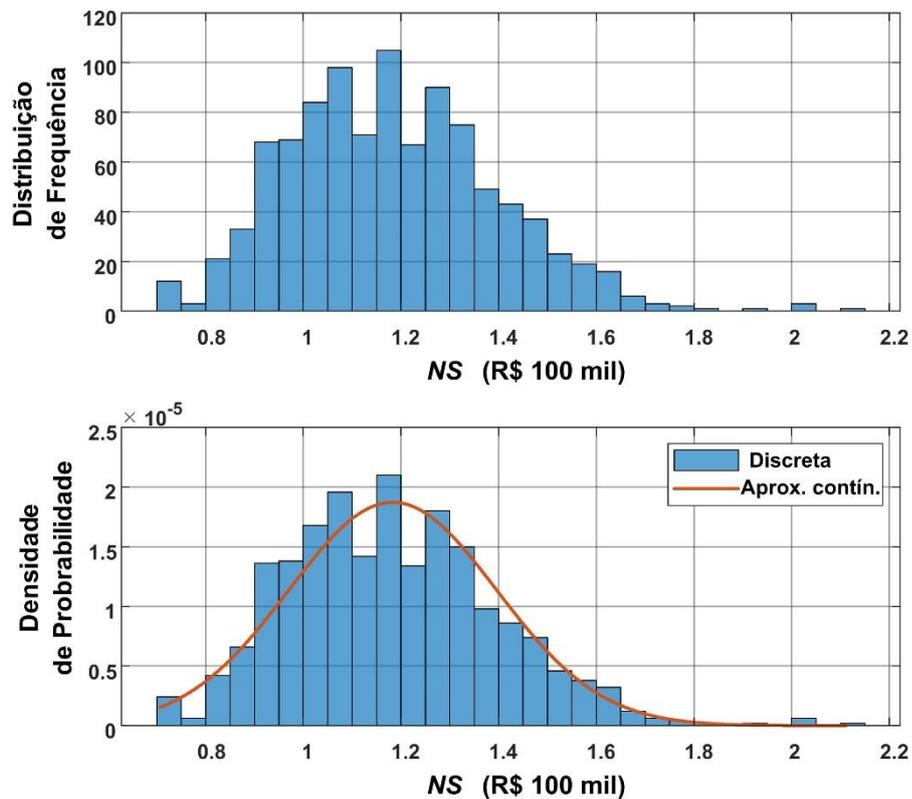


Figura F 9. Net Savings em função da distribuição de frequência e da distribuição de probabilidade para valor limite de novo carregamento de 0,90 na região centro-oeste.

