

Techno Economic Assessment of IE3 Electric Motors in the Medium Size Brazilian Industry

Adriano A. Gonçalves, Jr., Victor P. B. Aguiar, *Member, IEEE*, Adriano A. F. de Moura, Ricardo S. T. Pontes, and Wilkley B. Correia, *Member, IEEE*

Abstract—Searching for better efficient energy consumption, actions aimed at induction motors replacement have been consolidated as one of the main investments toward improve energy efficiency. For countries of wide range in electricity tariffs caused by geographic issues, industrial companies operating in different regions have difficulty to define how to direct the investment for energy efficiency actions between your industrial facilities. Thus, this paper aims to present how to direct the financial resources to perform the electric motors replacement to only one industrial facility from techno economic analysis through simulation of different scenarios for each case. Three regions of Brazil named Southeast, Midwest and Northeast were chosen for this analysis due to the highlight in their electricity tariffs characteristics. Regional aspects were taken into account, e.g., electricity escalation rate and electricity tariff as well as technical issues related to how limit the load of the new motors with reduced rated power after replacement. The results are promising because the cost-effectiveness of motors replacement in a medium-size industrial company always profitable regardless economic variations. The higher net savings defines what facilities in different regions of Brazil will have its motors replaced. So, the cost-effectiveness of motors replacement increases while electricity escalation rate, tariff and motor partial load increase as well.

Index Terms— Industrial economics, Cost benefit analysis, Induction motors, Electricity, Energy efficiency.

I. INTRODUÇÃO

A substituição de motores com baixos rendimentos por motores mais eficientes em instalações industriais tem-se consolidado como uma das principais ações de promoção da eficiência energética no Brasil. Através da ação governamental, chamado “projeto prioritário de incentivo a substituição de motores elétricos” na chamada N° 002/2015, da ANEEL, fomentou-se esta prática como política do Estado brasileiro [1] especialmente com a recente adoção dos índices de rendimento 3 (IR3, equivalente ao IE3 da IEC) como índice mínimo de rendimento para motores elétricos [2] [3].

Aliado a isso, investimentos em eficiência energética, como a substituição de motores, carecem de dados técnicos e econômicos precisos que comprovem a viabilidade e rentabilidade da substituição, apresentando ao empreendedor a relação custo-benefício da aquisição [4].

A. A. Gonçalves, Jr., V. P. B. Aguiar and A. A. F. de Moura are with Federal Rural University of the Semi-Arid Region, Mossoró, Brazil. E-mail: adriano.junior@alunos.ufersa.edu.br, victor@ufersa.edu.br and adrianoaron@ufersa.edu.br.

R. S. T. Pontes and W. B. Correia are with Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil. E-mail: ricthe@dee.ufc.br and wilkley@dee.ufc.br.

Métodos convencionais e largamente utilizados na análise de investimentos em eficiência energética não levam em consideração todos os fatores micro e macroeconômicos envolvidos na vida útil desses investimentos e geram o efeito rebote (*rebound effect*) [5].

Informações que permitem melhores tomadas de decisão gerencial podem ser obtidas aplicando-se o método da análise do custo de ciclo de vida (CCV) [6]. A análise do 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 [6]. Assim, pode-se determinar a viabilidade técnica-econômica a partir das variações no preço pago pela energia elétrica durante todo o ciclo de vida dos motores de indução trifásicos (MIT).

No aspecto técnico, o carregamento de um MIT pode ser aumentado durante a substituição e, conseqüentemente, melhor rendimento pode ser alcançado mantendo-se a potência fornecida à carga mecânica acoplada ao MIT [7]. Tal avaliação pode gerar uma redução na potência nominal do novo MIT e isto gera impacto financeiro na substituição, visto que os preços dos MIT aumentam em ordem crescente com o aumento das potências nominais [8].

Outra questão importante é a variação da taxa de escalada da tarifa de energia elétrica e da própria tarifa de energia elétrica, questões estas que afetam diretamente as análises do CCV na substituição de MIT [4] [5]. As variações observadas, tanto na taxa de escalada de energia elétrica quanto nas tarifas, se espalham entre as macrorregiões e os estados brasileiros [4] [8]. Desta forma, análises do CCV em substituição de MIT podem ser influenciadas também pela região ou estado do Brasil em que é realizada e isso afeta diretamente empresas industriais que possuem unidades fabris em localidades diferentes com plantas fabris semelhantes.

Assim, o trabalho pretende avaliar teoricamente a substituição de motores tipo MIT com níveis de rendimento indefinidos, do tipo IR2 ou classe padrão, mas em operação. A substituição seria realizada por novos motores tipo MIT, IR3, com reavaliação do carregamento e utilizando o método da análise de custo de ciclo de vida para avaliar o impacto econômico desta substituição visando definir qual a melhor filial de uma empresa industrial que deve ter seu conjunto de motores substituído.

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 será apresentada a influência da região do país na maior rentabilidade econômica frente a esta ação de eficiência energética e seus desdobramentos.

O trabalho é organizado nas seguintes seções: na seção II será apresentada a análise técnica da substituição de motores e na seção III a análise econômica, na seção IV é apresentada a determinação da taxa de escalada da energia elétrica e na seção V é apresentado o estudo de caso proposto que é a substituição de motores em indústrias e médio porte com unidades fabris em regiões distintas do Brasil. Por fim, na seção VI são apresentados os resultados da simulação dos cenários previstos e as conclusões na seção VII.

II. ANÁLISE TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES

Os motores trifásicos de indução (MIT) do tipo IR2 ou classe padrão e em operação podem ser substituídos por MIT com maior rendimento, obedecendo a certos critérios técnicos que vão ao encontro da sua justificativa para a substituição.

A. Substituição de Motores sem a Mudança de Carregamento

Na substituição de motores sem a mudança de carregamento, também conhecida como substituição direta, os MIT de rendimento inferior são substituídos por motores de maior rendimento, mantendo-se a potência nominal (P_n), um carregamento aproximadamente igual ao anterior (devido às mudanças nos rendimentos parciais que existem nos motores com IR diferentes) e, mesma condição de operação [9].

Esta variação ocorre devido às diferentes curvas *rendimento vs. carregamento* dos MIT [7] [9] [10]. É importante destacar que a variação de carregamento no eixo dos motores em operação é uma situação comum e o comportamento de determinados tipos de carga devem ser avaliados antes do uso desta técnica [7] [9]. Em países como o Brasil, a realização da substituição de motores direta ainda é feita de forma usual, uma vez que ainda existem motores em funcionamento com índices bem inferiores ao IR2 [10] [11].

B. Substituição de Motores Com a Mudança de Carregamento

Na substituição de motores com mudança de carregamento trabalha-se com a possibilidade do aumento no valor do carregamento do novo MIT em conjunto com a redução da potência nominal do mesmo. Ou seja, um determinado MIT IR2 pode ser substituído por um motor índice IR3 de potência nominal inferior, porém com maior carregamento e menor valor financeiro do investimento necessário. Estudos conforme [7] ilustram a situação apresentada.

Entretanto, o único consenso para um limite máximo de aumento do carregamento no dimensionamento do novo MIT é que este deve estar entre 80% e 90% da potência nominal (para operar no rendimento máximo) [9] [10]. Em (1) e (2) são apresentadas as equações que descrevem tal limite.

$$P_{Motor_Novo} = \frac{L_{Motor_Antigo}}{L_{Motor_Novo}} \cdot P_{Motor_Antigo} \quad (1)$$

$$K < \frac{L_{Motor_Antigo}}{L_{Motor_Novo}} \quad (2)$$

Onde P_{Motor_Novo} , L_{Motor_Novo} em (p.u), P_{Motor_Antigo} e L_{Motor_Antigo} em (p.u) representam respectivamente a potência nominal do motor novo e seu carregamento, a potência nominal do motor antigo e seu carregamento. A partir de (1) define-se a constante K , em (2), que varia entre 75% e 90% para um L_{Motor_Antigo} que varia de 60% a 80%, visto que a substituição direta (sem redução de P_{Motor_Novo}) pode não gerar mudanças significativas no novo carregamento [7] [9].

Desta forma, é garantido que P_{Motor_Novo} é menor que a P_{Motor_Antigo} . A constante K será o limite do carregamento na substituição, pois a ultrapassagem de 90% de carregamento no novo MIT não o levará ao maior rendimento tão pouco a maior rentabilidade financeira da substituição [9].

III. ANÁLISE ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES

Nesta seção é apresentada a análise econômica da substituição de motores baseado na metodologia da análise do custo de ciclo de vida (CCV).

A. Análise CCV Aplicada ao MIT

Na equação (3) é apresentado o custo do ciclo de vida de um MIT levando-se em conta todas as parcelas de custo que são modificáveis.

$$C_{CV} = C_I + C_E \quad (3)$$

Onde C_I é o investimento na compra do MIT, englobando a aquisição e instalação do motor, que pode ser à vista ou financiado, C_E é o custo da energia elétrica durante o ciclo de vida, ou seja, o consumo elétrico durante toda sua vida útil [11] [12].

Conforme [11] [12], o custo da energia elétrica consumida pelo motor de indução trifásico (MIT) é apresentado em (4), onde T é a tarifa atual da eletricidade em R\$/kWh, L representa o carregamento do motor em p.u., P_n é a potência nominal do motor em cv. O rendimento do mesmo é dado por $\eta(L)$, pois varia em relação ao carregamento e H é a variável relativa às horas por ano de operação do MIT.

$$C_E = \frac{0,736 \cdot P_n \cdot L \cdot T \cdot H}{\eta(L)} \quad (4)$$

B. Taxa de Escalada da Energia Elétrica e Taxa de Desconto

A taxa de escalada da energia elétrica (\hat{e}) constitui um parâmetro importante na análise econômica da substituição de motores, uma vez que através da mesma é possível determinar o aumento do preço da tarifa de energia elétrica em relação à inflação [4] [6] [12].

No caso específico da energia elétrica, as tarifas apresentam um comportamento diferenciado dos demais. Isso se dá 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 [8]. Aliado a isso, há uma influência direta na forma de geração, implicando diretamente no preço da tarifa, bem como a disponibilidade de recursos e até a dependência da importação de produtos [4] [8] [13].

Através da taxa de desconto (d) é possível atualizar os fluxos de caixa para o valor presente. Esta taxa mostra a desvalorização de um montante futuro (a receber) devido a uma taxa coerente para o investidor. Para projetos de eficiência energética, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece uma taxa de desconto de 12% [14].

C. Valor Presente

Custos relativos ao investimento inicial (C_I) e energia elétrica consumida (C_E) devem ser referenciados para um instante de tempo definido conforme o fluxo de caixa de determinado empreendimento [6]. Dessa forma as comparações entre custos e benefícios serão feitas sobre a mesma base monetária. O valor presente (VP) é definido 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 [6].

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 elétrica, a expressão do VP é dada conforme (5) sendo conhecida como valor presente uniforme modificado (VPUM) [6] [7].

$$VP_{CE} = \sum_{t=1}^n C_E \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \quad (5)$$

Onde VP_{CE} é o VPUM para os custos com energia elétrica ao fim de n anos (vida útil do MIT), t é a unidade de tempo correspondente em anos, \hat{e} a taxa de escalada da energia elétrica e d a taxa de desconto, ambas reais.

Igualmente, (6) apresenta o VP relacionado ao custo do determinado investimento [6] [7].

$$VP_{CI} = \sum_{t=0}^m \frac{C_I}{(1+d)^t} \quad (6)$$

Onde VP_{CI} é o VP para os investimentos esporádicos ao fim de m anos.

D. Método da Economia Líquida (Net Savings)

O método da economia líquida é considerado um método de medição da relação custo-benefício, ou rentabilidade, entre projetos de eficiência energética [6]. Através dele, será possível avaliar a rentabilidade da substituição de motores, utilizando o Valor Presente Líquido (VPL) ao longo do ciclo de vida das opções de investimento.

Assim, consideramos inicialmente o motor de baixo rendimento como situação atual, tendo suas grandezas representadas pelo índice (b_r) e um motor de maior rendimento representado pelo índice (a_r). A equação (7) apresenta o VPL para o MIT de baixo rendimento (VPL_{br}).

$$VPL_{br} = \sum_{t=1}^{n_{br}} \left[C_{Ebr} \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] + \sum_{t=0}^{m_{br}} \left[\frac{C_{Ibr}}{(1+d)^t} \right] \quad (7)$$

Onde n_{br} e m_{br} representam respectivamente o tempo de ciclo de vida do MIT de baixo rendimento e o tempo final de investimentos esporádicos no mesmo. Analogamente, (8) apresenta a equação do VPL para opção de motor alto rendimento (VPL_{ar}).

$$VPL_{ar} = \sum_{t=1}^{n_{ar}} \left[C_{Ear} \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \right] + \sum_{t=0}^{m_{ar}} \left[\frac{C_{Iar}}{(1+d)^t} \right] \quad (8)$$

Equação (9) apresenta a economia líquida (NS), expressa através da diferença entre o VPL_{br} e o VPL_{ar} .

$$NS = VPL_{br} - VPL_{ar} \quad (9)$$

Para valores de NS maiores que zero, o investimento é considerado economicamente rentável [6].

Para situação específica da substituição de motores, algumas considerações devem ser feitas em (7) e (8). Primeiro, será considerado que o investimento inicial ocorrerá antes da entrada em operação, ou seja, em $t=0$. Além disso, as opções de baixo rendimento (situação atual) e alto rendimento (motor substituto) terão o mesmo tempo de ciclo de vida (n). Assim, (9) será calculado conforme (10) [7].

$$NS = \Delta E \cdot \sum_{t=1}^n \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t - \Delta I \quad (10)$$

Onde ΔE (variação dos custos com energia elétrica) e ΔI (variação dos custos do investimento inicial) são apresentadas em (11) e (12) [7].

$$\Delta E = C_{Ebr} - C_{Ear} \quad (11)$$

$$\Delta I = C_{Iar} - C_{Ibr} \quad (12)$$

IV. DETERMINAÇÃO DA TAXA DE ESCALADA DA ENERGIA ELÉTRICA

Para a realização do estudo faz-se necessário o cálculo da taxa de escalada da energia elétrica para classe de consumo industrial por região do Brasil. Nesse sentido, a Fig. 1 apresenta o fluxograma que ilustra as etapas necessárias para o processo de obtenção da taxa de escalada da tarifa de energia elétrica [15].

Após coleta de dados foi possível à estratificação dos valores de consumo (EC) e receita (RE) para classe de consumo industrial por região do Brasil. Assim, é apresentada a tarifa média da eletricidade (Tf_{media}) em (13).

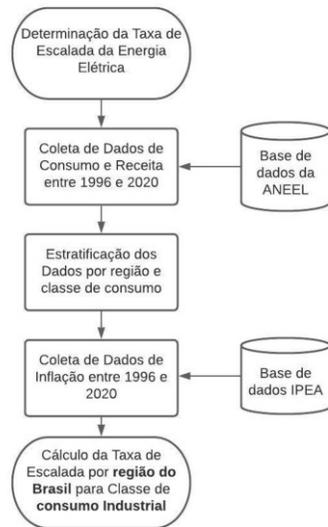


Fig. 1. Fluxograma do cálculo da taxa de escalada de energia elétrica.

$$Tf_{media} = \frac{RE(R\$)}{EC(MWh)} \quad (13)$$

De forma subsequente, fez-se coleta dos índices de inflação acumulados mês a mês entre os anos de 1996 e 2020, obtidos em [16] na base de dados do IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

A. Cálculo da Taxa de Escalada da Energia Elétrica

A Figura 2 ilustra a variação da tarifa média acumulada da energia elétrica para classe de consumo industrial na região Centro-Oeste do Brasil em relação à inflação acumulada entre os anos de 1996 e 2020. Cada região do Brasil teve uma curva específica similar a Fig. 2. A inflação apresentada na Fig. 2 é acumulada desde o ano base de 1996 até 2020 também.

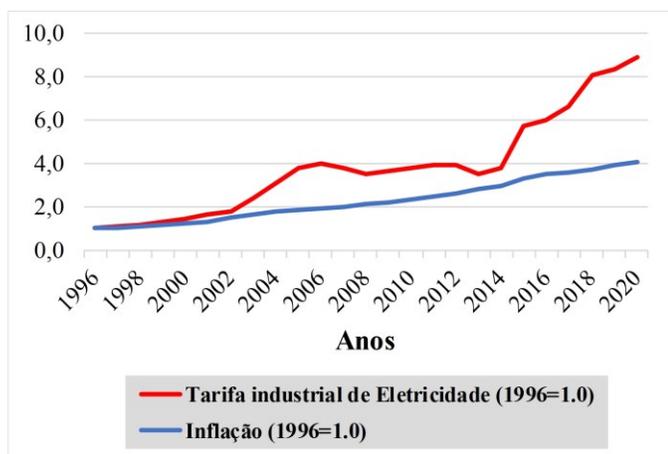


Fig. 2. Evolução da tarifa média acumulada de energia elétrica para classe de consumo industrial na região centro-oeste do Brasil em relação à inflação acumulada entre os anos de 1996 e 2020.

Por fim, obtém-se a taxa de escalada de energia, calculada conforme (14).

$$\hat{e} = \left(\frac{1 + T_{acum_tarifa}}{1 + T_{acum_inflação}} \right) - 1 \quad (14)$$

Em (14), T_{acum_tarifa} e $T_{acum_inflação}$ são as taxas acumuladas da tarifa de energia elétrica e da inflação, respectivamente. A Tabela I apresenta as taxas de escalada e as tarifas médias calculadas por região do Brasil para classe de consumo industrial [15] [16].

TABELA I
TAXAS DE ESCALADA E TARIFAS MÉDIAS POR REGIÃO DO BRASIL PARA CLASSE DE CONSUMO INDUSTRIAL

Região	Tarifa Média (R\$/MWh)	Taxa de Escalada (\hat{e})
Sudeste	491,16	3,35
Centro-Oeste	511,47	3,17
Sul	467,03	2,54
Nordeste	456,08	2,35
Norte	510,48	1,37

V. ESTUDO DE CASO PROPOSTO: SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES EM INDÚSTRIA DE MÉDIO PORTE COM UNIDADES FABRIS EM REGIÕES DISTINTAS DO BRASIL

O estudo de caso em questão propõe-se a realizar a substituição de motores em uma empresa industrial com plantas fabris de médio porte em regiões distintas do Brasil. O presente estudo fará uso de planta industrial já utilizada na literatura [7].

Diferentemente do realizado em [7], a avaliação técnica e econômica da substituição será realizada em todos os motores da indústria. Ao todo, a indústria conta com 62 motores trifásicos em potências que variam de 3 a 50 cv, todos com 2 pares de polos, 60 Hz, 380 V, descritos a seguir:

- 1) 20 motores (MIT) de 3 cv, cada;
- 2) 6 motores (MIT) de 4 cv, cada;
- 3) 22 motores (MIT) de 5 cv, cada;
- 4) 8 motores (MIT) de 7,5 cv, cada;
- 5) 2 motores (MIT) de 30 cv, cada;
- 6) 2 motores (MIT) de 40 cv, cada;
- 7) 2 motores (MIT) de 50 cv, cada.

Dessa forma, foi considerado que os motores em operação serão da classe IR2, tomando os resultados conservativos, pois os rendimentos podem ser da classe *standard*/padrão ou menores [2].

Para análise econômica serão utilizados os valores de horas de operação dos motores por ano, tarifa média por hora e taxa de escalada. A quantidade de horas trabalhadas consideradas foi de 4368 horas [7].

A precificação dos motores IR2 baseou-se na prospecção de valores já tabelados e apresentados na literatura [8], corrigidos pela inflação acumulada do período até abril de 2021. Os motores IR3 estão presentes no mercado normalmente com acesso a preços [17].

VI. SIMULAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES

Levando-se em conta todas as informações apresentadas na seção V do presente trabalho, foi elaborado um código de programação utilizando MATLAB para automatizar o cálculo técnico e econômico das trocas de motores IR2 por motores IR3.

A. Variação do Carregamento e Vida Útil dos MIT

Baseado em [4] [8], que apresentam carregamentos médios para motores em 3 faixas de potências nominais para motores fabricados no Brasil, Europa e EUA, foram definidas faixas e a possível variação dos carregamentos, conforme Tabela II.

TABELA II
CARREGAMENTOS MÍNIMO E MÁXIMO PARA FAIXAS DE POTÊNCIA NOMINAL DOS MIT

Faixa de Potência Nominal	Carregamento Mínimo (L_{min}) p.u.	Carregamento Máximo (L_{max}) p.u.	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)
$P_n \leq 10$ cv	0,400	0,620	0,510	0,0635
10 cv $\leq P_n < 50$ cv	0,540	0,640	0,590	0,0289
$P_n \geq 50$ cv	0,540	0,730	0,635	0,0548

Mediante a proposta os dados referentes aos carregamentos foram utilizados para o cálculo da média (μ) e do desvio padrão (σ) conforme uma distribuição uniforme, baseado nos dados da Tabela II.

Na sequência, utilizando o MATLAB é gerada a população de valores de carregamento para determinada potência nominal apresentada na seção V, com números pseudorrandômicos por distribuição normal.

Sobre a vida útil dos MIT, foram considerados os dados observados em [4] [8] e apresentados na Tabela III a serem utilizados no simulador.

TABELA III
TEMPO MÉDIO DE VIDA ÚTIL DO MIT

Faixa de Potência Nominal	1,0 cv – 1,5 cv	1,5 cv – 15 cv	15 cv – 150 cv
Vida Útil Média (anos)	10	12	15

B. Funcionamento do Simulador

Em linhas gerais, o simulador técnico e econômico é apresentado na Fig. 3. As entradas do simulador são divididas em duas etapas: a primeira etapa apresenta duas entradas relativas aos dados técnicos da população de motores da unidade fabril: a potência nominal de todos os motores da unidade fabril ao qual se deseja realizar a substituição e a quantidade de motores, por potência, a serem trocados. A segunda etapa é introduzir o valor do limite máximo do novo carregamento (K). É com base nesse valor K a referência para as trocas por MIT de potência nominal inferior.

Na segunda etapa entra-se com os dados relativos às especificidades econômicas. Dessa forma, deve ser informada a tarifa de energia elétrica (em R\$/kWh), a taxa de desconto (d) utilizada, a taxa da escalada da energia elétrica (\hat{e}) e a

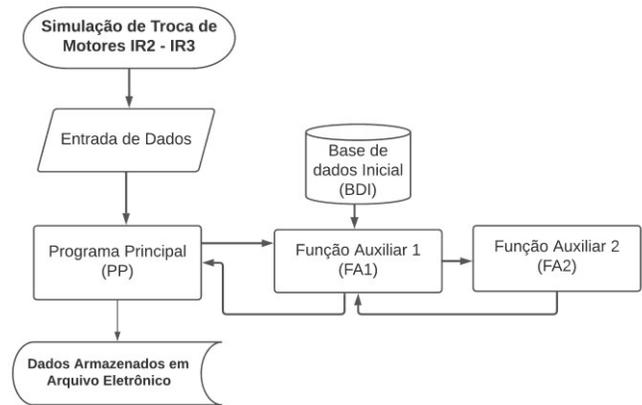


Fig. 3. Fluxograma do Simulador Técnico e Econômico da Substituição de Motores IR2 - IR3.

quantidade de horas/ano trabalhadas para os motores da unidade fabril.

Todas as entradas anteriormente citadas irão alimentar o programa principal (PP). O PP aciona a função auxiliar 1 (FA1) onde será realizada a simulação propriamente dita da substituição de motores IR2 por motores IR3.

Nesta função é feita a geração dos carregamentos aleatórios da população de motores, a análise do carregamento atual, a tomada de decisão para a substituição por MIT de mesma potência nominal ou potência diretamente inferior, *e.g.*, se um motor de 30 cv deve ser substituído por um motor de potência nominal inferior, automaticamente será 25 cv, independentemente se o motor de 20 cv também pode ser usado conforme (2).

A FA1 também necessita de uma função auxiliar 2 (FA2) que é responsável por atestar a viabilidade da substituição de motores com base nos métodos apresentados na seção III. Na FA2 estão os dados relativos aos preços dos MIT enquanto no banco de dados inicial (BDI) estão os dados catalogados de motores comerciais necessários a FA1, tais como os rendimentos parciais para todos os MIT tipo IR2 e tipo IR3 [17].

Importante informar que o número de cenários previstos para simulação é uma variável de entrada do PP e pra cada cenário simulado, PP acessa a função FA1. Ao término da simulação de todos os cenários previstos, PP salva os dados em uma planilha eletrônica para o pós-processamento. Para este estudo, em cada caso serão simulados 1000 cenários diferentes.

C. Regiões do Brasil em Estudo

Foram escolhidas três regiões do Brasil como casos de estudo da substituição motores em uma indústria de médio porte: Sudeste (SE), Centro-Oeste (CO) e Nordeste (NE).

As regiões Sudeste e Centro-oeste foram escolhidas por apresentarem respectivamente as maiores taxas de escalada e tarifa, segundo a Tabela I. Além disso, a região Sudeste (SE) apresenta a segunda maior tarifa de energia e a região Centro-Oeste (CO) a maior tarifa dentre as regiões do Brasil. A escolha da região Nordeste (NE) é realizada como referência para o estudo. Ademais, a mesma apresenta a quarta maior taxa de escalada e a menor tarifa do país.

D. Especificações da Simulação

Para cada região foram realizadas quatro simulações utilizando limites de carregamento para a substituição de MIT por outro de menor potência nominal (K) iguais a 0,75, 0,80, 0,85 e 0,90.

VII. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção apresenta os principais resultados da análise técnica e econômica realizada após as simulações dos casos previstos.

A. 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.

Dessa forma, a Fig. 4 apresenta o gráfico de Pareto do caso $K=0,75$ e região Centro-Oeste (CO), indicando quantos motores tiveram potência nominal (P_n) reduzida na substituição em relação aos 1000 cenários simulados.

Com base na Fig. 4, a distribuição de frequência mostra que em 82,7% dos cenários simulados, a quantidade de MIT que tiveram potência reduzida em relação à potência original na substituição de motores fica entre 39 e 47 motores em relação aos 62 presentes na planta fabril. Para cada valor dessa faixa, em nenhum cenário a quantidade de motores com potência reduzida ultrapassou a frequência de 10% do total de cenários.

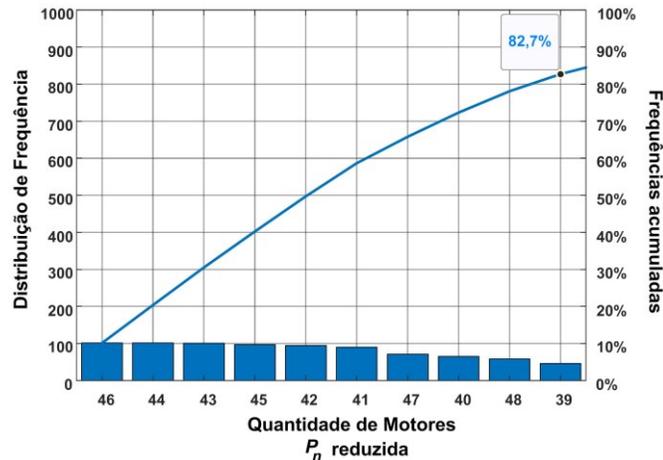


Fig. 4. Substituição dos MIT que possuem potência nominal reduzida para K igual a 0,75 na região CO.

Expandido os resultados para os demais casos, a Tabela IV apresenta, em resumo, os resultados para o aspecto técnico da substituição: quantos MIT substituídos tiveram sua potência reduzida e carregamento aumentado.

Por meio da Tabela IV, observa-se que os valores mínimos, máximos e a frequência acumulada de motores substitutos com potência nominal inferior ao motor original independem dos aspectos regionais e econômicos.

O aumento do limite K resulta em:

- 1) Redução da faixa da quantidade de motores substituídos com potência nominal inferior e, conseqüentemente, maior carregamento;

TABELA IV
MOTORES SUBSTITUTOS QUE POSSUEM POTÊNCIA REDUZIDA EM RELAÇÃO À POTÊNCIA ORIGINAL

Região	K	Quantidade de Motores Substitutos com P_n Inferior		Freq. Total Acumulada
		Mínimo	Máximo	
NE	0,75	39	48	82,0%
	0,80	47	56	88,0%
	0,85	53	62	96,3%
	0,90	57	62	96,6%
SE	0,75	39	48	82,0%
	0,80	47	56	88,5%
	0,85	53	61	91,1%
	0,90	57	62	97,3%
CO	0,75	39	48	82,7%
	0,80	47	56	87,9%
	0,85	53	61	95,7%
	0,90	57	62	96,9%

- 2) Aumento da média desta quantidade de motores substituídos com potência nominal inferior e;
- 3) Aumento direto da frequência total acumulada na respectiva faixa.

O aumento de K nos mostra que há aumento da quantidade de motores substituídos, independente da forma de substituição. A análise técnica na substituição de motores, levando em conta o carregamento é imprescindível para que se alcance melhor eficiência energética da fábrica como um todo.

B. Análise Econômica: Economia Líquida Total e Quantidade de MIT com NS viável

Observando a economia líquida (NS) total de cada cenário simulado em cada caso, é possível verificar uma distribuição de frequência em valores financeiros para cada caso. A Fig. 5 apresenta esta distribuição de frequência para $K=0,9$ na região Centro-Oeste (CO).

Observando a Fig. 5, vê-se que nos valores da economia líquida total deste cenário, a maior frequência de valores fica entre R\$ 115.000,00 e R\$ 120.000,00 (informa-se ainda que cada coluna corresponda a um intervalo de R\$ 5.000,00). Na Fig. 6 é apresentada a função densidade de probabilidade (PDF) da distribuição da Fig. 5 com a aproximação da curva equivalente contínua normal (gaussiana).

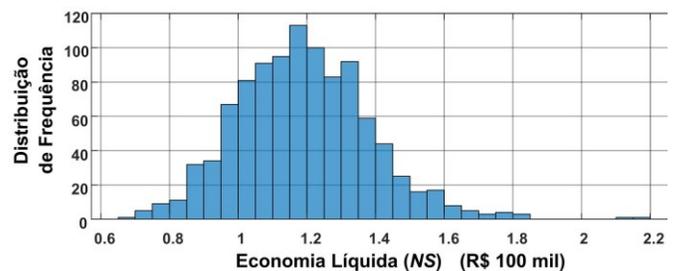


Fig. 5. Distribuição de frequências da economia líquida total para K igual a 0,9 na região CO.

Conforme constatado na Fig. 6, a distribuição de frequências tem um aspecto estatístico. A curva da PDF é uma gaussiana assimétrica positiva e o valor mínimo é um valor positivo. Para a definição do método da economia líquida, na seção III.D, significa que mediante 1000 cenários simulados, o

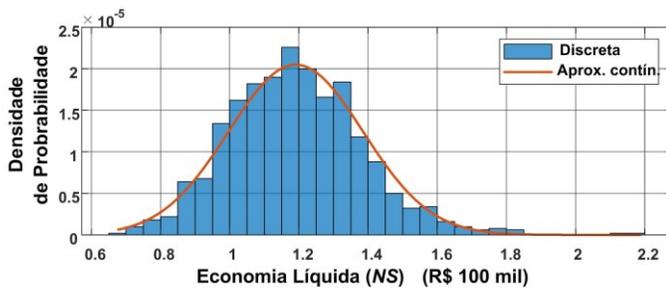


Fig. 6. Função densidade de probabilidade da economia líquida total para K igual a 0,9 na região CO e a função aproximada da distribuição normal (gaussiana).

menor valor de economia líquida total ainda possui boa rentabilidade.

A Tabela V ilustra a economia líquida média, mínima e máxima por K , definido anteriormente, e região do Brasil.

TABELA V
ECONOMIA LÍQUIDA MÉDIA, MÍNIMA E MÁXIMA POR REGIÃO DO BRASIL E CONSTANTE K

Região	K	Economia Líquida (NS) Total		
		Média	Mínima	Máxima
NE	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
SE	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
CO	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

Como em todos os outros casos simulados a economia líquida total teve o mesmo comportamento, conclui-se que, ao observarmos os valores mínimos de NS na Tabela V, a substituição dos motores elétricos (MIT) de uma indústria, mesmo que no pior cenário, ainda é rentável e independe da taxa de escalada de energia elétrica, tarifa imposta e do limite K . Analisando a Tabela V, observa-se que no valor médio, o NS fica maior para valores de $K \geq 0,8$. Isto fortalece a ideia de que a técnica de readequação da potência nominal dos motores em caso de baixo carregamento é adequada do ponto de vista técnico e econômico. A técnica permite uma renovação das instalações motrizes de uma empresa garantindo rentabilidade.

Ainda avaliando a Tabela V, observa-se também que as médias relativas à economia líquida total da região CO é sempre maior que a das demais regiões para uma mesma constante K analisada, assim como as do SE são sempre maiores que as do NE para um mesmo K .

A região CO tem melhores valores médios que a região SE, entretanto a região CO tem a maior tarifa média, enquanto a região SE tem a maior taxa de escalada de energia elétrica. Desta forma, conclui-se que tanto a taxa de escalada de energia elétrica quanto à tarifa média influenciam em melhores economias líquidas e rentabilidades, entretanto a alta

tarifa média ainda parece ser a causa dominante de influência sobre melhores rentabilidades financeiras.

Na Figura 7 o diagrama de Pareto apresenta as quantidades mais representativas de MIT em que a substituição é viável ($NS > 0$). Observa-se na Fig. 7 que 99,3% dos cenários simulados tiveram 60, 61 ou 62 (total) motores com NS viável. Assim, difere-se que a economia líquida total, apresentada na Tabela V e Fig. 6 não tem a participação dos MIT com NS inviável, pois neste caso não deve ser feita a substituição. A Tabela VI apresenta a quantidade de motores com NS viável para todos os casos estudados.

Em qualquer dos casos, as frequências acumuladas são acima de 95% e o pior intervalo de quantidades viáveis é entre 57 e 60 motores. De fato no NE o número de 62 motores com NS viável não é alcançado, entretanto no SE e no CO sim. Nota-se que os casos com 100% dos motores com NS viável ocorrem no CO e $K \geq 0,85$.

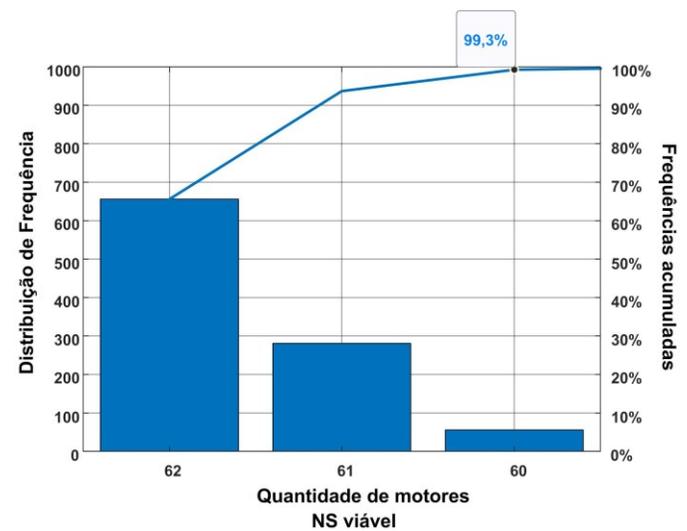


Fig. 7. Quantidade de MIT com economia líquida (NS) rentável para K igual a 0,85 na região SE.

VIII. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo teórico relativo à substituição de motores de indução com níveis de rendimento

TABELA VI
QUANTIDADE DE MOTORES COM NS VIÁVEL

Região	K	Quantidade de Motores com NS viável		Freq. Total Acumulada
		Mínimo	Máximo	
NE	0,75	57	60	98,1%
	0,80	57	60	99,3%
	0,85	62	60	95,4%
	0,90	57	60	99,3%
SE	0,75	60	62	95,7%
	0,80	60	62	99,2%
	0,85	60	62	99,3%
	0,90	60	62	99,3%
CO	0,75	60	62	99,8%
	0,80	61	62	99,8%
	0,85	-	62	100,0%
	0,90	-	62	100,0%

indefinidos por motores de nível IR3 utilizando o método da análise do CCV para avaliar o impacto econômico desta substituição de forma global em uma empresa industrial com plantas fabris em diferentes regiões do Brasil.

A simulação das trocas é realizada automaticamente com auxílio de um programa computacional tal que leva em conta o nível de carregamento do motor e, portanto foi introduzida para fins deste estudo a constante K , que limita a substituição do antigo MIT por um novo motor de potência reduzida, pois limita o novo carregamento.

Inicialmente, a análise técnica aponta que independente dos aspectos econômicos, mais de 82% dos cenários simulados em cada caso (taxa de escalada de eletricidade, \hat{e} , tarifa média, T , e K , todos definidos) tem um carregamento tão baixo que são trocados por MIT com potências nominais menores que a do MIT original. À medida que K aumenta, a porcentagem aumenta ultrapassando os 90% dos cenários simulados para $K \geq 0,85$.

No aspecto econômico, a primeira análise é relativa à economia líquida total. Ficou claro em todos os casos simulados que um processo de substituição de motores em todos os motores da fábrica gera uma economia líquida (NS) positiva e, portanto viável e rentável até no pior caso. A importância desta conclusão aumenta quando sabemos que isto independe da região (\hat{e} e T) e de K . Importante destacar que para $K \geq 0,75$ os maiores valores médios de NS são estatisticamente alcançados. Na segunda análise relativa à economia líquida total, verifica-se que com as técnicas de substituição de motores empregadas mais de 98% dos MIT da fábrica tem NS viável (positivo). Fica clara a ótima relação custo-benefício da substituição de motores, nos moldes propostos, em uma empresa industrial e fornecendo a esta ferramentas gerenciais para o correto direcionamento dos recursos para promoção da eficiência energética.

Será proposto um estudo mais aprofundado para determinar de fato, qual a relação de dominância entre \hat{e} e T , pois como foi observado, apesar da região Sudeste (SE) ter maior \hat{e} que o Centro-Oeste (CO), o inverso ocorre em relação a T , e vê-se que as maiores economias líquidas totais são da região CO. A aplicação desta metodologia em outros assuntos relacionados à energia e seu gerenciamento, como no setor de geração distribuída residencial, também é uma futura proposição. Utilizar a energia economizada (*Energy Saved Cost*) para medição da relação custo-benefício em conjunto com a economia líquida (NS) é mais um trabalho futuro que pode corroborar ou limita os resultados apresentados neste trabalho.

Por fim, como propostas futuras mais voltadas à questões técnicas: (1) a inserção de uma análise do descarte do motor a ser substituído e sua influência na análise dos custos do ciclo de vida, (2) a identificação e modelagem da depreciação do rendimento do MIT, (3) assim como uma análise mais profunda de motores subdimensionados na população de motores do Brasil fortaleceriam as políticas para trocas massivas de motores energeticamente ineficientes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e ao LAMOTRIZ da Universidade Federal do Ceará pelo suporte computacional. O artigo foi

financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

REFERENCES

- [1] Governo Federal do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética. (2015, October). *Chamada no 002/2015, Projeto Prioritário de Eficiência Energética, Incentivo à Substituição de Motores Elétricos: Promovendo a Eficiência Energética no Segmento de Força Motriz*. [Online]. Available: <https://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica.pdf>
- [2] Governo Federal do Brasil. Ministério de Minas e Energia, Gabinete do Ministro. (2017, June 29). *Portaria Interministerial. n. 1, Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo*. [Online]. Available: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cgiee/arquivos/portarias/2017-portaria-interministerial-mme-mctic-mdic-n_1-2017-motores-eletricos-trifasicos.pdf
- [3] *Máquinas elétricas girantes. Parte 1: Motores de indução trifásicos - Requisitos*, ABNT NBR 17094-1, ABNT, Rio de Janeiro, 2018.
- [4] C. T. C. Andrade, “Uma Abordagem Determinística com Análise de Incerteza para a Viabilidade de Programas de Eficiência Energética,” Ph.D. thesis, Dept. Electric Eng., Ceará Fed. Univ., Fortaleza, Brasil, 2017.
- [5] S. Sorrell. “The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy-wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency,” UK Energy Research Centre. London, U.K. Oct., 2007. [Online] Available: <https://www.ukerc.ac.uk/publications/the-rebound-effect-and-assessment-of-the-evidence-for-economy-wide-energy-savings-from-improved-energy-efficiency/>.
- [6] S. K. Fuller and S. R. Petersen. “Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program,” National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg, MD, USA, Feb. 1996. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/publications/life-cycle-costing-manual-federal-energy-management-program-nist-handbook-135-1995>.
- [7] K. C. D. Lima et al., Santo André, SP, Brasil. Avaliação Técnico-Econômica da Troca de Motores Industriais pela Análise do Carregamento e Cálculo da Economia Líquida em uma Indústria Salineira. Presented at VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). [Online]. Available: <https://eventos.galoa.com.br/sbse-2020>
- [8] C. T. C. Andrade, R. S. T. Pontes, “Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors,” *Energy Policy*, vol. 106, no. 7, pp. 315–325, Jul. 2017, 10.11016/j.enpol.2017.03.029.
- [9] G. A. McCoy and J. G. Douglass. “Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide – A Handbook for Industry,” US Department of Energy. Washington, DC, USA, Feb., 2014. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/premium-efficiency-motor-selection-and-application-guide-handbook-industry>.
- [10] I. Boldea and S. A. Nasar, “Steady-State Equivalent Circuit and Performance” in *The Induction Machine Handbook*, 2nd ed. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2010, ch. 7.
- [11] V. P. B. Aguiar, “Avaliação técnico-econômica do aumento do rendimento em motores de indução trifásicos de baixa potência após rebobinagem,” Ph.D. thesis, Dept. Electric Eng., Ceará Fed. Univ., Fortaleza, Brasil, 2017.
- [12] V. P. B. Aguiar, R. S. T. Pontes, and F. J. T. E. Ferreira, “Technical and Economic Evaluation of Efficiency Improvement after Rewinding in Low-Power Induction Motors: A Brazilian Case,” *Energies*, vol. 11, no. 7, Jul. 2018, Art. no. 1701, 10.3390/en11071701.
- [13] X. Yu, J. M. Cruz, and J. C. Crittenden, “Regional energy rebound effect: The impact of economy-wide and sector level energy efficiency improvement in Georgia, USA,” *Energy Policy*, vol. 87, no. 12, pp. 250-259, Dez. 2015.
- [14] Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Brasília, Brazil. 2008. [Online]. Available: <https://www.aneel.gov.br/documents/656831/14944470/Manual+de+Elaboracao+do+PEE+2008.pdf>

- [15] Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Brasília, Brazil. [Online]. Available: <https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>.
- [16] Ipeadata. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília, Brazil. [Online]. Available: <https://www.ipeadata.gov.br>.
- [17] Catálogo eletrônico WEG W22. WEG Motores. Jaraguá do Sul, Brazil. [Online]. Available: https://www.weg.net.catalog/weg/BR/pt/Motores-Elétricos/c/BR_MT.



Adriano A. Gonçalves Jr. was born in 1994, in Mossoro, Brazil. He received the B.S. degree in electrical engineering from Federal Rural University of Semi-Arid Region (UFERSA), Mossoro Brazil, in 2018 and M.S. degree in electrical engineering from UFERSA, Mossoro, Brazil in 2021.



Victor P. B. Aguiar (S'13 M'19) was born in 1983, in Fortaleza, Brazil. He received the B. S., M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Federal University of Ceará (UFC), Fortaleza, Brazil in 2006, 2008 and 2018, respectively.

From 2008 to 2009 he was an Assistant Professor with Federal University of

Rondônia (UNIR). Since 2009 he has been Adjunct Professor with the Engineering and Technology Department, Federal Rural University of Semi-Arid Region (UFERSA), Mossoro, Brazil. His research interest includes electric machines, industrial energy efficiency and motor driven systems modeling and control.



Adriano A. F. de Moura was born in 1983, in Mossoro, Brazil. He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Federal University of Ceará (UFC), Fortaleza, Brazil in 2006, 2009 and 2013, respectively.

From 2009 to 2010 he was an Assistant Professor with University of Fortaleza (UNIFOR). Since 2010 he has been

Adjunct Professor with the Engineering and Technology Department, Federal Rural University of Semi-Arid Region (UFERSA), Mossoro, Brazil. His research interest includes power systems: generation, transmission and end-use of electricity and renewable energy applications.

Dr. de Moura has eight books published both Portuguese and English, including the title *Transmission of Electrical Energy Overhead Lines* in 2020.



Ricardo S. T. Pontes was born in Fortaleza, Brazil. He received the B.S. degree from Federal University of Ceará, Fortaleza, Brazil in 1979 and received the M.S. degree from University of Brasília,

Brasília, Brazil in 1983. In 2002, he received the Ph.D. degree from Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

Since 1979, he has been Professor with Electrical Engineering Department, Federal University of Ceará, Fortaleza, Brazil and since 2017 he has been lecturer with University of Fortaleza, Brazil. His research interest includes development and innovation in electrical engineering, special electric machines, linear motors, industrial automation and industrial energy efficiency.

Dr. Pontes has more than 100 publications in the field of electrical powers systems. Dr. Pontes received the distinguished professor award from Centre of Technology, Federal University of Ceará, in 2020.



Wilkley B. Correia (M'19) received the B.S. degree from the former Federal University of Paraíba, Campina Grande, Brazil, in 1998, M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Federal University of Ceará, Fortaleza, Brazil, in 2010 and 2016, respectively.

Since 2009 he has been an Associate Professor with the Federal University of

Ceará, earlier in Sobral until 2016 and then Fortaleza. His research interests have always been with the control area, regarding to optimal robust, adaptive and predictive control.

Lately Dr. Correia has devoted his works towards the control of electrical machines and drives.