

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES/ ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO FINAL DE CURSO

Pedro Rios Ribeiro Murad

**Regime Contínuo com e sem Inversor de Frequência: Análise Técnico-Econômica
em Bombas e Ventiladores Centrífugos**

Projeto Final de Curso como parte dos requisitos para
obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica
apresentados à Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cassio Hideki Fujisawa – Orientador – POLI-PUC Goiás.

Prof. Me Carlos Alberto Vasconcelos Bezerra – Avaliador – POLI-PUC Goiás

Prof. Dr Antônio Marcos de Melo Medeiros – Avaliador – POLI-PUC Goiás.

Goiânia, 8 de dezembro de 2025.

Regime Contínuo com e sem Inversor de Frequência: Análise Técnico-Econômica em Bombas e Ventiladores Centrífugos

Pedro Rios Ribeiro Murad e Cassio Hideki Fujisawa

Resumo – Este trabalho apresenta uma análise técnico-econômica de um painel de partida direta operando em regime permanente (PD) e do inversor de frequência (VFD) no acionamento de uma bomba centrífuga e de um ventilador centrífugo com motores de indução trifásicos de baixa tensão. A partir de dados de catálogo de equipamentos comerciais e de cenários de operação típicos (potência nominal, horas anuais de funcionamento e tarifa de energia), estimam-se a potência elétrica média, o consumo anual de energia e o custo anual de operação para cada forma de acionamento. A análise, de natureza quantitativa, utiliza leis de afinidade para cargas centrífugas e expressões simples de balanço energético, incluindo a estimativa do investimento em painéis de acionamento (CAPEX) e do payback simples da substituição do painel de partida direta operando em regime permanente pelo inversor de frequência. Nos cenários estudados, a bomba operando com VFD em rotação reduzida apresenta redução de energia da ordem de 47 % e payback inferior a um ano, enquanto o ventilador, com menor tempo de uso e redução de velocidade mais moderada, apresenta economia menor e payback em torno de 3 a 4 anos. Conclui-se que a adoção de inversores de frequência em bombas e ventiladores é mais atrativa em aplicações com elevado número de horas anuais e margem para redução de rotação, não devendo a decisão se apoiar apenas na potência do motor ou no menor custo inicial.

Palavras-chave—*Inversor de frequência; painel de partida direta operando em regime permanente; bombas centrífugas; ventiladores centrífugos; eficiência energética; análise técnico-econômica.*

Abstract – This work presents a techno-economic analysis of direct-on-line starting (DOL) and variable frequency drives (VFD) in the operation of a centrifugal pump and a centrifugal fan driven by low-voltage three-phase induction motors. Based on catalog data of commercial equipment and typical operating scenarios (rated power, annual operating hours and electricity tariff), the average electrical power, annual energy consumption and annual operating cost are estimated for each type of drive. The quantitative analysis uses affinity laws for centrifugal loads and simple energy balance equations, including the estimation of the investment in switchgear panels (CAPEX) and the simple payback for replacing DOL starting with a VFD. In the studied scenarios, the pump operating with a VFD at reduced speed shows an energy reduction of about 47% and a payback of less than one year, whereas the fan, with fewer operating hours and a more

moderate speed reduction, presents smaller savings and a payback of around 3 to 4 years. It is concluded that the adoption of VFDs in pumps and fans is more attractive in applications with a high number of annual operating hours and real margin for speed reduction, and that the decision should not rely only on motor rated power or on the lowest initial panel cost.

Keywords—*Variable frequency drive; direct-on-line starting; centrifugal pumps; centrifugal fans; energy efficiency; techno-economic analysis.*

I. INTRODUÇÃO

Motores de indução trifásicos são largamente empregados no acionamento de bombas e ventiladores em aplicações industriais, respondendo por parcela significativa do consumo de energia elétrica. Nesses sistemas, a forma de acionamento e de controle da velocidade do motor impacta diretamente o desempenho elétrico, o consumo de energia e o custo de operação ao longo da vida útil da instalação. [1], [3].

Entre as alternativas mais utilizadas, o painel de partida direta operando em regime permanente (**PD**) é adotada pela simplicidade e pelo baixo investimento inicial, enquanto o inversor de frequência (**VFD**) permite ajustar a velocidade do motor às necessidades do processo, com potencial de economia de energia e maior flexibilidade de operação. Por outro lado, a solução com VFD implica aumento do investimento em capital (**CAPEX**) em relação ao painel de partida direta operando em regime permanente e demanda maior cuidado de especificação e aplicação. Na prática, a escolha entre manter a PD ou adotar VFD em bombas e ventiladores muitas vezes é feita com base apenas no menor custo inicial, sem uma avaliação comparativa estruturada que considere simultaneamente o desempenho elétrico, energético e econômico. [3], [5].

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho é comparar, sob os aspectos elétrico, energético e econômico, o acionamento por um painel de partida direta operando em regime permanente e por inversor de frequência em uma bomba centrífuga e em um ventilador centrífugo utilizados em aplicações industriais. Para atingir esse objetivo, são definidos cenários de operação representativos para as duas máquinas, estimam-se a potência elétrica, o consumo anual de energia e o custo anual de operação em cada cenário, calculam-se os investimentos em painéis de acionamento para PD e VFD e o consequente aumento de CAPEX associado ao uso do inversor de frequência, determina-se a economia de energia e a redução de custo anual obtidas com

o VFD em relação à PD e, por fim, avalia-se o tempo de retorno do investimento adicional, comparando os resultados entre a aplicação de bombeamento e a de ventilação. [3], [4].

A organização do texto é a seguinte: na secção 2 apresenta-se o referencial teórico sobre motores de indução, bombas e ventiladores centrífugos, métodos de acionamento, inversores de frequência e fundamentos de análise técnico-econômica. Na secção 3 descreve-se a metodologia adotada para definição dos cenários, obtenção dos dados e cálculo das grandezas elétricas, energéticas e econômicas. Na secção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para as aplicações de bombeamento e ventilação. Por fim, a secção 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

II. REFERENCIAS TEÓRICAS

Esta secção apresenta os fundamentos necessários para a comparação entre painel de partida direta operando em regime permanente (PD) e inversor de frequência (VFD) no acionamento de motores de indução trifásicos aplicados a uma bomba centrífuga e a um ventilador centrífugo. São abordados o comportamento dessas cargas centrífugas, os métodos de acionamento, a composição dos painéis utilizados e os conceitos de análise técnico-econômica (CAPEX, OPEX e payback) que serão empregados na secção 4. [1], [3]–[5].

A. Cargas centrífugas, bombas/ventiladores e leis de afinidade

Bombas e ventiladores centrífugos são máquinas de fluxo amplamente utilizadas em aplicações industriais para transporte de líquidos e gases. Em catálogos de fabricantes, seu comportamento é representado por curvas que relacionam vazão, altura manométrica ou pressão, potência no eixo e rendimento para uma rotação de referência. [1], [4], [11], [12].

Do ponto de vista do acionamento, essas máquinas se comportam como **cargas centrífugas**: a potência mecânica requerida no eixo do motor depende fortemente da velocidade de rotação. Para variações moderadas em torno da rotação nominal, é comum utilizar uma forma simplificada das chamadas **leis de afinidade**, que relaciona a potência no eixo com a rotação conforme a equação 1[3], [4]:

$$\frac{P_{\text{eixo},1}}{P_{\text{eixo},2}} \approx \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (1)$$

em que:

$P_{\text{eixo},1}$ é a potência mecânica no eixo no ponto 1 (kW);

$P_{\text{eixo},2}$ é a potência mecânica no eixo no ponto 2 (kW);

n_1 é a rotação no ponto 1 (rpm);

n_2 é a rotação no ponto 2 (rpm);

Essa expressão mostra que, em cargas centrífugas, a potência varia aproximadamente com o **cu**do da velocidade. Por exemplo, ao reduzir a rotação para 80 % da nominal ($n_2/n_1 = 0,8$), a potência no eixo cai para cerca de $(0,8)^3 \approx 51\%$ do valor original; para 90 % da nominal

($n_2/n_1 = 0,9$), a potência passa a aproximadamente $(0,9)^3 \approx 73\%$ da potência inicial. [3], [4], [9].

No contexto deste trabalho, essa relação é usada na secção 4 para estimar a nova potência no eixo da bomba e do ventilador quando a rotação é reduzida por meio de inversor de frequência, permitindo comparar o consumo de energia entre os cenários com um painel de partida direta operando em regime permanente (rotação nominal) e com VFD (rotação reduzida). [3],[4],[18]

B. Painel de partida direta operando em regime permanente em bombas e ventiladores

No painel de partida direta operando em regime permanente (PD), a tensão nominal da rede é aplicada diretamente aos terminais do motor de indução. Em regime permanente, o motor opera próximo à rotação nominal definida pela frequência da rede. [1], [2], [7]

Em sistemas de bombeamento e ventilação com PD, o controle de vazão ou pressão é normalmente feito por estrangulamento mecânico:

- válvulas no recalque de bombas;
- dampers ou registros em dutos de ventiladores.

Nessa configuração, a bomba ou o ventilador permanece girando em rotação nominal, e o ponto de operação é deslocado na curva da máquina por meio de perdas adicionais impostas pela válvula ou pelo damper. Em muitas situações, isso mantém a potência elétrica próxima do valor nominal mesmo com vazão reduzida, o que tende a resultar em consumo de energia elevado ao longo do tempo. [3]–[5]

Por outro lado, o painel de partida direta operando em regime permanente apresenta vantagens relevantes para as aplicações estudadas:

- solução de acionamento **simples**, amplamente conhecida na indústria;
- **baixo custo inicial** de painel e facilidade de instalação e manutenção.

Neste trabalho, a PD é adotada como **condição de referência** para a bomba centrífuga e o ventilador centrífugo, servindo de base para a comparação com a solução de acionamento por inversor de frequência. [3], [5], [9].

C. Inversores de frequência em bombas e ventiladores

Os **inversores de frequência (VFD)** são conversores estáticos que permitem variar a frequência e a amplitude da tensão aplicada ao motor de indução, controlando a velocidade de rotação do eixo. Em termos simplificados, o inversor retifica a tensão alternada da rede, forma um barramento em corrente contínua e, em seguida, sintetiza uma tensão alternada com frequência ajustável na saída. [1], [2], [13].

Em bombas e ventiladores centrífugos, isso possibilita duas funcionalidades importantes:

- **partida suave**, com rampas de aceleração e limitação de corrente;

- **operação em rotações inferiores à nominal**, ajustando a vazão ou a pressão à demanda real do processo.

Quando a rotação é reduzida, a potência no eixo diminui de acordo com a relação cúbica apresentada na equação (2.1). Dessa forma, pequenas reduções de velocidade podem gerar **reduções significativas de potência** em aplicações que operam grande parte do tempo em carga parcial. [3]–[5], [13].

Neste trabalho, a potência elétrica média é estimada, de forma simplificada, a partir da potência no eixo e do rendimento global do conjunto motor–acionamento com base na equação 2:

$$P_{el} \approx \frac{P_{eixo}}{\eta_{conj}} \quad (2)$$

em que:

P_{eixo} é a potência elétrica média absorvida da rede (kW);

P_{el} é a potência mecânica no eixo do motor (kW);

η_{conj} é o rendimento global do conjunto motor–acionamento (adimensional).

No painel de partida direta operando em regime permanente, considera-se $\eta_{conj} \approx \eta_m$; com VFD, $\eta_{conj} \approx \eta_m \cdot \eta_{VFD}$. Essa relação é utilizada nas secções 3 e 4 para estimar o consumo de energia em cada cenário de acionamento. [3], [5], [13].

D. Painéis de acionamento e valores de referência

A comparação entre o painel de partida direta operando em regime permanente e inversor de frequência neste trabalho considera painéis de acionamento simples e padronizados para a bomba centrífuga de 3 cv (2,2 kW) e para o ventilador centrífugo de 3 hp (2,2 kW), com equipamentos de um mesmo fabricante, de forma a permitir a avaliação do investimento em capital (CAPEX). [6], [10]–[13].

Para o **acionamento do painel de partida direta operando em regime permanente (PD)**, tanto da bomba quanto do ventilador, é adotado um painel com a seguinte composição básica:

- disjuntor-motor **GV2ME10**;
- contator **LC1D09M7**;
- relé térmico **LRD10**.

Com base em valores típicos de mercado, o custo conjunto desses três equipamentos é da ordem de **R\$ 880,00**, valor utilizado como referência para o painel de partida direta em regime permanente. [10]–[13].

Para o **acionamento com inversor de frequência (VFD)**, considera-se um painel formado por:

- disjuntor-motor **GV2ME10** a montante;
- inversor de frequência **Altivar Machine ATV320U22N4C** (2,2 kW, 380...500 V).

O custo de referência adotado para o ATV320U22N4C é de aproximadamente **R\$ 3.700,00**, resultando em um valor total próximo de **R\$ 3.950,00** para os principais equipamentos do painel com VFD.

A diferença entre esses valores, da ordem de **R\$ 3.070,00**, é considerada como **investimento adicional Δ** da solução com inversor de frequência em relação à partida direta, sendo utilizada nos cálculos econômico-energéticos

apresentados na secção 2 tópico “Análise técnico-econômica: CAPEX, OPEX, economia de energia e payback” e na secção 4. [3], [5], [9].

E. Análise técnico-econômica: CAPEX, OPEX, economia de energia e payback

Em estudos de eficiência energética em sistemas de acionamento elétrico, é comum distinguir dois tipos principais de dispêndio:

- o **investimento em capital (CAPEX)**, associado ao custo inicial de aquisição e instalação de equipamentos, como motores, painéis de partida e inversores de frequência; [3],[5],[10],[18]
- o **custo operacional (OPEX)**, relacionado às despesas recorrentes de operação, sendo a parcela de energia elétrica uma das mais relevantes em bombas e ventiladores que operam muitas horas por ano. [3],[5],[10],[18]

Considerando uma potência elétrica média P_{el} (kW) e um tempo de operação anual t_{anual} (h/ano), o **consumo anual de energia** de um sistema de acionamento pode ser expresso pela equação 3:

$$E_{anual} = P_{el} \times T_{Anual} \quad (3)$$

em que:

E_{anual} é a energia elétrica anual consumida (kWh/ano);

P_{el} é a potência elétrica média (kW);

T_{Anual} é o tempo anual de operação (h/ano).

Adotando uma tarifa média de energia elétrica **Tarifa**(R\$/kWh), o **custo anual de energia** associado à operação do equipamento é obtido pela equação 4:

$$C_{anual} = E_{anual} \times Tarifa \quad (4)$$

em que:

C_{Anual} é o custo anual de energia (R\$/ano);

E_{anual} é a energia anual consumida (kWh/ano);

Tarifa é a tarifa média de energia elétrica (R\$/kWh).

Na comparação entre duas alternativas de acionamento, por exemplo o painel de partida direta operando em regime permanente (PD) e inversor de frequência (VFD), obtêm-se consumos anuais E_{PD} e E_{VFD} e custos anuais C_{PD} e C_{VFD} .

A economia anual de energia elétrica e a correspondente economia anual de custo de energia são obtidas, respectivamente, pelas equações (5) e (6).

$$\Delta E = E_{PD} - E_{VFD} \quad (5)$$

$$\Delta C = C_{PD} - C_{VFD} \quad (6)$$

em que:

ΔE é a economia anual de energia elétrica (kWh/ano);

E_{PD} é a energia elétrica anual consumida no cenário com painel de partida direta (kWh/ano);

E_{VFD} é a energia elétrica anual consumida no cenário com inversor de frequência (kWh/ano);

ΔC é a economia anual de custo de energia (R\$/ano);

C_{PD} é o custo anual de energia elétrica no cenário com painel de partida direta (R\$/ano);

C_{VFD} é o custo anual de energia elétrica no cenário com inversor de frequência (R\$/ano).

Quando há diferença de investimento inicial entre as alternativas de acionamento, adota-se, neste trabalho, o critério de payback simples para estimar o tempo necessário para que a economia anual de custo de energia compense o investimento adicional. Denotando-se por ΔI a diferença de CAPEX entre as soluções consideradas (por exemplo, o custo adicional de um painel com VFD em relação a um painel com partida direta), o payback simples é dado pela equação (7):

$$PB = \frac{\Delta I}{\Delta C} \quad (7)$$

em que:

PB é o tempo de retorno simples do investimento (anos);

ΔI é o investimento adicional no painel com inversor de frequência em relação ao painel com partida direta (R\$);

ΔC é a economia anual de custo de energia (R\$/ano).

O resultado PB indica o tempo, em anos, necessário para recuperar o investimento adicional a partir da economia anual de custo de energia. Essas relações são amplamente empregadas em análises comparativas de alternativas de acionamento elétrico com diferentes investimentos iniciais e diferentes consumos energéticos, como no caso de bombas e ventiladores centrífugos acionados por partida direta ou por inversores de frequência. [3], [5], [9].

III. METODOLOGIA

Esta seção descreve a metodologia adotada para comparar, sob os aspectos elétrico, energético e econômico, o acionamento por partida direta e por inversor de frequência em uma bomba centrífuga e em um ventilador centrífugo. São apresentadas as premissas do estudo, os equipamentos considerados, os cenários de operação definidos e o procedimento de cálculo utilizado para obter potência elétrica, consumo anual de energia, custo anual e payback. [3], [4], [8].

O estudo está delimitado a motores de indução trifásicos de baixa tensão acionando bombas e ventiladores centrífugos, operando em regime contínuo ou semicontínuo. A análise é baseada em modelos teóricos e em dados típicos de catálogos de fabricantes, sem realização de ensaios experimentais em bancada. As comparações entre partida direta (PD) e inversor de frequência (VFD) são feitas por meio de cenários representativos de operação, quantificando o impacto no consumo de energia, no custo anual de operação e no investimento em painéis de acionamento. [3], [5].

De forma resumida, a metodologia adotada neste trabalho segue quatro etapas principais:

- **Definição das premissas gerais de análise**, incluindo a tarifa média de energia elétrica e os rendimentos típicos dos conjuntos motores–acionamento;
- **Seleção dos equipamentos e dos painéis de acionamento**, abrangendo bomba centrífuga, ventilador centrífugo, motores de indução e

painéis em partida direta e com inversor de frequência, com base em catálogos de fabricantes e preços de referência;

- **Definição de cenários de operação em regime contínuo para a bomba e para o ventilador**, considerando o acionamento por painel de partida direta (PD) e por painel com inversor de frequência (VFD);
- **Aplicação das relações apresentadas no referencial teórico (seção 2)** para o cálculo da potência elétrica, do consumo anual de energia, do custo anual de operação, da economia anual de energia e de custo e do tempo de retorno simples (payback) do investimento adicional no VFD.

A. Premissas de tarifa e rendimentos dos acionamentos

Antes da apresentação dos equipamentos e dos cenários de operação, sintetizam-se nesta subseção as principais premissas adotadas para a modelagem energético-econômica dos acionamentos.

Para ambas as aplicações analisadas (bomba centrífuga e ventilador centrífugo), foi considerada uma tarifa média de energia elétrica de **R\$ 0,80/kWh**, representativa de consumidores industriais de baixa tensão. Esse valor tem caráter aproximado e busca refletir a ordem de grandeza das tarifas praticadas para unidades industriais de pequeno porte, sendo adequado para os objetivos comparativos deste estudo.

O rendimento do motor de indução trifásico foi assumido como $\eta_{\text{motor}} = 88\%$, valor típico de motores da classe de eficiência IE3 na faixa de potência de 2,2 kW, conforme catálogos de fabricantes como a WEG [10]. Já o rendimento do inversor de frequência foi considerado como $\eta_{VFD} = 97\%$, em linha com a faixa de rendimentos declarada para conversores de velocidade de potência equivalente em baixa tensão [3], [5], [9].

Esses valores têm caráter representativo: não se pretende reproduzir o desempenho de um equipamento específico em campo, mas sim caracterizar, de forma simplificada, o comportamento de conjuntos motor–acionamento modernos em aplicações industriais de pequeno porte, garantindo consistência entre os cenários analisados para a bomba centrífuga e para o ventilador centrífugo.

B. Equipamentos e dados de catálogos utilizados

Para tornar a comparação concreta, foram selecionados equipamentos reais de mercado, de porte compatível com aplicações industriais de pequena potência:

1. Aplicação 1 – Bomba centrífuga

Para a primeira aplicação, foi selecionada a motobomba centrífuga Schneider BC-92 S 1C, com motor de indução trifásico de 3 cv (2,2 kW) para 220/380 V, fabricada pela Schneider Motobombas [11]. A escolha recaiu sobre esse modelo por se tratar de equipamento amplamente utilizado

em aplicações industriais de pequeno porte, com dados de catálogo acessíveis e curva característica completa.

A partir do catálogo do fabricante, adotou-se um ponto de operação representativo com vazão em torno de 15 m³/h e altura manométrica de aproximadamente 30 m.c.a., para o qual a curva de rendimento hidráulico da bomba indica valores na faixa de 45 % a 55 %. Por simplicidade, e visando à comparação entre os cenários de acionamento, considerou-se neste estudo um rendimento típico de 50 %, valor intermediário coerente com o porte da máquina e suficiente para os objetivos da análise comparativa [11].

Para o motor de indução trifásico acoplado à bomba, foram utilizados valores típicos de motores da classe de eficiência IE3 na faixa de potência de 2,2 kW, obtidos em catálogos de fabricantes como a WEG [10]. Nessa condição, o rendimento nominal situa-se em torno de 88 %, com fator de potência compatível com motores de 4 polos em baixa tensão. Assim, adotou-se $\eta_{\text{MOTOR}} \approx 0,88$ como valor de referência nos cálculos elétricos.

II. Aplicação 2 – Ventilador centrífugo

Para a segunda aplicação, foi selecionado o ventilador centrífugo industrial EC3 TAR, com motor de 3 hp (2,2 kW) para 220/380 V, do fabricante Ventisilva [12]. Esse modelo é representativo de sistemas de exaustão e ventilação industrial de pequeno porte, permitindo a obtenção de dados de vazão, pressão e potência em catálogos técnicos.

Com base nas curvas fornecidas pelo fabricante, considerou-se um ponto nominal de operação com vazão em torno de 2 700 m³/h e pressão aproximada de 190 mm.c.a., resultando em potência mecânica no eixo próxima de 2,0 kW. Catálogos de ventiladores centrífugos industriais desse porte indicam rendimentos aerodinâmicos na faixa de 60 % a 75 % [4], [12]. Neste trabalho, esse comportamento é incorporado por meio da potência de eixo de 2,0 kW utilizada nos cálculos, sem detalhamento do ponto exato de máximo rendimento, uma vez que o foco está na comparação elétrico-energética e econômico-financeira entre os cenários de acionamento.

Para o motor de indução acoplado ao ventilador, adotaram-se as mesmas hipóteses de rendimento da aplicação da bomba (motor trifásico de 2,2 kW, classe de eficiência IE3, com rendimento nominal em torno de 88 %), de forma a garantir consistência entre as duas aplicações [10].

III. Painéis de acionamento e valores de referência

Para os painéis de acionamento, foram considerados arranjos padronizados, compostos por equipamentos comerciais da Schneider Electric, dimensionados para motores de 2,2 kW em baixa tensão. Essa padronização permite comparar o investimento inicial (CAPEX) das alternativas a partir de valores representativos de mercado, sem perder o foco nos objetivos do trabalho. [6], [10]–[13]

No cenário com painel de partida direta (PD), tanto para a bomba centrífuga quanto para o ventilador centrífugo foi adotado um painel típico composto pelos seguintes equipamentos da Schneider Electric:

- **Disjuntor-motor GV2ME10 (Schneider Electric)** – dispositivo de proteção magnetotérmica e seccionamento do circuito de alimentação do motor, responsável pela proteção contra curtos-circuitos e sobrecargas de maior magnitude (**valor unitário de referência: R\$ 250,00**);
- **Contator LC1D09M7 (Schneider Electric)** – elemento de manobra eletromecânica utilizado para o comando de acionamento e desligamento do motor em regime contínuo (**valor unitário de referência: R\$ 300,00**);
- **Relé térmico LRD10 (Schneider Electric)** – relé de sobrecarga ajustável, associado ao contator, destinado à proteção do motor contra sobrecargas prolongadas (**valor unitário de referência: R\$ 330,00**).

Com base em cotações junto a distribuidores de equipamentos elétricos, o custo conjunto desses três componentes situa-se em torno de R\$ 880,00, valor que foi adotado neste trabalho como referência para o CAPEX do painel com partida direta.

No cenário com inversor de frequência (VFD), o painel considerado é constituído pelos seguintes equipamentos, também do fabricante Schneider Electric:

- **Disjuntor-motor GV2ME10 (Schneider Electric)** – instalado a montante do inversor, desempenhando novamente as funções de proteção magnetotérmica e seccionamento do circuito de alimentação (**valor unitário de referência: R\$ 250,00**);
- **Inversor de frequência Altivar Machine ATV320U22N4C (Schneider Electric)** – conversor de velocidade para motores de indução trifásicos de 2,2 kW, responsável pela partida suave, pelo controle da velocidade de rotação e pela operação em diferentes pontos de carga (**valor unitário de referência: R\$ 3.700,00**).

Neste painel, não é utilizado relé térmico externo, uma vez que as funções de proteção contra sobrecarga e sobrecorrente do motor são realizadas pelas proteções internas do próprio inversor de frequência, que incorpora modelo térmico e limites de corrente configuráveis.

Para esse arranjo, o valor de referência adotado para o investimento inicial foi de aproximadamente R\$ 3.950,00, correspondente ao custo típico do inversor ATV320U22N4C acrescido do disjuntor-motor de entrada. A diferença entre os custos dos dois painéis ($\Delta I \approx \text{R\$}3.070,00$) é tratada neste trabalho como investimento adicional associado à adoção do inversor de frequência, sendo utilizada posteriormente nos cálculos de payback simples apresentados na análise econômico-energética da bomba e do ventilador.

Esse valor é utilizado posteriormente no cálculo do payback simples para a bomba e para o ventilador. [3],[4],[5],[13].

C. Definição dos cenários de operação

Para cada aplicação (bomba e ventilador), são definidos dois cenários de operação:

- **cenário PD** – acionamento em partida direta, com o motor operando em rotação nominal e o controle de vazão ou pressão realizado por estrangulamento mecânico (válvula na bomba, damper no ventilador); [3], [5].
- **cenário VFD** – acionamento com inversor de frequência, operando com rotação reduzida em relação à nominal, ajustada à demanda do processo.

As **premissas de operação** adotadas para os cálculos são:

I. Bomba centrífuga

- Horas de operação: **16 h/dia**;
- Dias de operação por ano: **300 dias/ano**, resultando em $t_{\text{anual, bomba}} = 4.800\text{h/ano}$;
- No cenário VFD, considera-se operação predominante a **80 % da rotação nominal** ($n_2/n_1 = 0,8$), aplicada às leis de afinidade para bombas centrífugas.

II. Ventilador centrífugo

- Horas de operação: **8 h/dia**;
- Dias de operação por ano: **220 dias/ano**, resultando em $t_{\text{anual, vent}} = 1.760\text{h/ano}$;
- No cenário VFD, considera-se operação predominante a **90 % da rotação nominal** ($n_2/n_1 = 0,9$), aplicada às leis de afinidade para ventiladores centrífugos.

Para ambas as aplicações, é adotada uma **tarifa média de energia elétrica de R\$ 0,80/kWh**, representando um valor típico para consumidores industriais de baixa tensão. O rendimento do motor é assumido como **88 %**, e o rendimento do inversor de frequência é considerado na faixa de **97 %**, valores coerentes com equipamentos modernos de porte semelhante. [3], [5], [9].

Essas premissas permitem construir cenários coerentes com aplicações industriais de pequeno porte, mantendo a comparabilidade entre bomba e ventilador [3], [4].

D. Procedimento de cálculo dos indicadores elétricos, energéticos e econômicos

O cálculo dos indicadores elétricos, energéticos e econômicos é realizado de forma sistemática, aplicando as relações apresentadas no referencial teórico (seção 2) aos cenários definidos na seção 3 tópico “Definição dos cenários de operação”.

1. Potência no eixo nos cenários PD e VFD

- A partir dos dados de catálogo, adota-se para cada equipamento uma potência mecânica no eixo $P_{\text{eixo},1}$ no ponto de operação nominal (cenário PD), próxima de 2,0 kW. [11], [12].
- No cenário VFD, a potência no eixo $P_{\text{eixo},2}$ é estimada utilizando a lei de afinidade para cargas centrífugas (equação 2.1), considerando a razão de

rotação n_2/n_1 de cada aplicação (0,8 para a bomba e 0,9 para o ventilador). [3], [4].

2. Potência elétrica média em PD e com VFD

- Para a partida direta, a potência elétrica média é estimada a partir da potência no eixo e do rendimento do motor, utilizando a relação geral apresentada na seção 2 (equação 2.2, com $\eta_{\text{conj}} \approx \eta_m$).
- Para o acionamento com VFD, a potência elétrica média considera a potência no eixo calculada para rotação reduzida e o rendimento combinado motor-inversor ($\eta_{\text{conj}} \approx \eta_m \cdot \eta_{\text{VFD}}$) [3], [5].

3. Energia anual consumida

- Com a potência elétrica média P_{el} de cada cenário e o tempo de operação anual t_{anual} (bomba e ventilador), calcula-se o consumo **anual de energia** pela expressão:

$$E_{\text{anual}} = P_{el} \times t_{\text{anual}} \quad (3)$$

conforme equação (3).

4. Custo anual de energia (OPEX de energia)

- Adotando a tarifa média $\text{Tarifa} = \text{R\$ } 0,80/\text{kWh}$, o **custo anual de energia** de cada cenário é obtido por:

$$C_{\text{anual}} = E_{\text{anual}} \times \text{Tarifa} \quad (4)$$

conforme equação (4).

5. Economia de energia e economia de custo

- Para cada aplicação (bomba e ventilador), calcula-se a economia anual de energia da solução com VFD em relação à partida direta pela diferença:

$$\Delta E = E_{PD} - E_{VFD} \quad (5)$$

conforme equação (5).

- De forma análoga, a economia anual de custo (redução de OPEX de energia) é calculada por:

$$\Delta C = C_{PD} - C_{VFD} \quad (6)$$

conforme equação (6).

6. Payback simples da solução com VFD

- Por fim, a **viabilidade econômica** da adoção do VFD é avaliada por meio do **payback simples**, relacionando o investimento adicional ΔI (diferença de CAPEX entre os painéis VFD e PD, estimada em aproximadamente R\$ 3.070,00) com a economia anual de custo ΔC :

$$PB = \frac{\Delta I}{\Delta C} \quad (7)$$

conforme equação (7).

- Esse indicador é calculado separadamente para a bomba e para o ventilador, permitindo comparar em qual das duas aplicações a adoção do inversor de frequência apresenta retorno mais rápido.

Os resultados numéricos obtidos com esse procedimento potências, energias anuais, custos anuais, economias e payback – são apresentados e discutidos na seção 4, por meio de tabelas e gráficos comparando partida direta e inversor de frequência em cada aplicação. [3], [5].

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta a comparação entre partida direta (PD) e inversor de frequência (VFD) nas duas aplicações estudadas uma bomba centrífuga e um ventilador centrífugo avaliando o consumo anual de energia, o custo de operação (OPEX), o investimento em painéis de acionamento (CAPEX) e o tempo de retorno do investimento (payback).

Os resultados numéricos foram obtidos a partir dos dados de catálogo e das premissas de operação resumidas na seção 3, aplicando-se as relações teóricas apresentadas na seção 2. O detalhamento do passo a passo dos cálculos é apresentado no **Apêndice B**, enquanto o detalhamento das cotações de equipamentos utilizadas na estimativa do CAPEX dos painéis consta no **Apêndice A**.

A. Aplicação 1 – Bomba centrífuga

A Tabela I apresenta os valores de potência elétrica média, consumo anual de energia e custo anual de energia da bomba centrífuga, para os dois cenários de acionamento considerados: painel com partida direta (PD) e painel com inversor de frequência (VFD). As grandezas foram calculadas a partir das relações apresentadas na seção de Metodologia, adotando-se rendimento nominal do motor de indução de $\eta_{\text{motor}} = 88\%$ em ambos os cenários e rendimento do inversor de frequência de $\eta_{\text{VFD}} = 97\%$ no caso com VFD, conforme as premissas previamente estabelecidas.

TABELA I. Desempenho energético e custo anual de energia da bomba centrífuga

Grandezas	PD	VFD
Potência elétrica média (kW)	2,27	1,2
Horas de operação (h/ano)	4.800	4.800
Energia anual (kWh/ano)	10.909	5.758
Custo anual (R\$/ano)	8.727,27	4.606,56

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Observa-se que, no cenário com partida direta, a bomba opera próxima da potência nominal do motor, resultando em um consumo anual de energia elevado, devido ao longo tempo de operação diário. Com a adoção do inversor de frequência e a operação em rotação reduzida (cerca de 80 % da rotação nominal), a potência elétrica média apresenta queda significativa, o que se reflete em uma **redução**

expressiva do consumo anual de energia e, consequentemente, do custo anual de energia da aplicação.

A diferença entre os cenários PD e VFD corresponde a uma economia anual de energia da ordem de alguns milhares de kWh e a uma **redução de aproximadamente 45–50 % no custo anual de energia** da bomba. Esses resultados indicam que, sob as condições analisadas, a variação de velocidade por meio de inversor de frequência é altamente eficaz do ponto de vista energético na aplicação de bombeamento.

Além disso, considerando os valores de CAPEX dos painéis apresentados em 2 tópico “Análise técnico-econômica: CAPEX, OPEX, economia de energia e payback”, o painel com VFD apresenta um investimento adicional em relação ao painel de partida direta. Quando essa diferença de investimento é comparada com a economia anual de custo de energia, obtém-se um **payback simples inferior a 1 ano** para a bomba, o que caracteriza uma forte atratividade econômico-energética da adoção do inversor nessa aplicação.

B. Aplicação 2 – Ventilador centrífugo

A Tabela II apresenta os resultados obtidos para o ventilador centrífugo, nos cenários com painel de partida direta (PD) e com painel com inversor de frequência (VFD), considerando as horas anuais de operação e a redução de rotação estabelecidas na seção 3, no tópico “Definição dos cenários de operação”. As grandezas foram calculadas a partir das relações apresentadas na seção de Metodologia, adotando-se rendimento nominal do motor de indução de $\eta_{\text{motor}} = 88\%$ em ambos os cenários e rendimento do inversor de frequência de $\eta_{\text{VFD}} = 97\%$ no caso com VFD, conforme as premissas previamente estabelecidas.

TABELA II. Desempenho energético e custo anual de energia do ventilador centrífugo

Grandezas	PD	VFD
Potência elétrica média (kW)	2,27	1,71
Horas de operação (h/ano)	1.760	1.760
Energia anual (kWh/ano)	4.000	3.006
Custo anual (R\$/ano)	3.200,00	2.404,95

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No caso do ventilador, também se verifica redução de potência elétrica média e de consumo anual de energia com o uso do inversor de frequência. Entretanto, a magnitude dessa redução é menor do que na bomba, por dois motivos principais:

- o ventilador opera **menos horas por ano** do que a bomba;
- a redução de rotação assumida com VFD é **mais moderada** (cerca de 90 % da rotação nominal, em vez de 80 %).

Como consequência, tanto a economia anual de energia quanto a redução no custo anual de energia são menores em termos absolutos e percentuais. Ainda assim, o uso do VFD proporciona melhoria de desempenho energético em relação

à partida direta, diminuindo o OPEX de energia da aplicação de ventilação.

Quando se compara essa economia anual de custo com o mesmo investimento adicional em painel com VFD adotado para a bomba, o **payback simples** calculado para o ventilador situa-se em torno de **3 a 4 anos**, indicando um retorno financeiro mais lento. Nessa aplicação, a decisão pela adoção do inversor de frequência tende a ser mais sensível ao perfil de utilização, à tarifa de energia e às políticas de investimento da instalação.

C. Síntese geral dos resultados obtidos

Considerando em conjunto os resultados obtidos para a bomba centrífuga (Tabela I) e para o ventilador centrífugo (Tabela II), observa-se que a adoção do inversor de frequência em ambos os casos proporciona redução de potência elétrica média, de consumo anual de energia e de custo anual de energia quando comparada ao acionamento em partida direta. A magnitude dessa economia, contudo, é significativamente diferente entre as duas aplicações: na bomba, o longo tempo de funcionamento anual e a possibilidade de operar com redução mais acentuada de rotação resultam em elevada economia de energia e em payback simples inferior a 1 ano, enquanto no ventilador, o menor número de horas de operação por ano e a redução de rotação mais limitada conduzem a economias menores e a um payback na faixa de 3 a 4 anos. Assim, os resultados ilustram que a economia de energia obtida com o uso de inversores de frequência em bombas e ventiladores depende de forma decisiva do perfil de utilização (horas anuais de operação) e do grau de redução de rotação adotado em cada cenário analisado.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho comparou, em termos técnico-econômicos, o acionamento em regime contínuo por meio de painel de partida direta (PD) e de painel com inversor de frequência (VFD) aplicados a uma bomba centrífuga e a um ventilador centrífugo, utilizando dados de catálogos e cenários de operação representativos. Nos resultados, a bomba, devido ao maior número de horas anuais de funcionamento e à possibilidade de redução mais significativa de rotação, apresentou forte redução de consumo de energia e de custo anual, com payback simples inferior a 1 ano para o uso do VFD. No ventilador, por operar menos horas por ano e com redução de rotação mais moderada, a economia de energia foi menor e o payback situou-se na ordem de alguns anos, indicando que o acionamento com painel de partida direta pode permanecer tecnicamente aceitável e economicamente viável em aplicações com baixo fator de utilização.

De forma geral, conclui-se que a escolha entre manter o acionamento em painel de partida direta ou adotar um inversor de frequência em bombas e ventiladores não deve se basear apenas na potência do motor ou no menor custo inicial do painel, mas principalmente no perfil de operação (horas de funcionamento por ano), na possibilidade real de reduzir a rotação e nas condições de tarifa de energia. Este estudo utilizou hipóteses simplificadas, como dados de catálogo, pontos de operação fixos, tarifa única e avaliação

econômica restrita ao payback simples; como continuidade, recomenda-se a realização de estudos com medições em campo ou em bancada, perfis de carga variáveis, consideração de outros métodos de acionamento e aplicação de indicadores financeiros mais completos, de modo a aprofundar a análise em diferentes contextos industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- [2] BIM, E. Máquinas Elétricas e Acionamento. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- [3] DIAS, M. V. X.; VENTURINI, O.; CARVALHO, R. D. M.; YAMACHITA, R. A. Eficiência Energética: Teoria & Prática. Itajubá: FUPAI/UNIFEI; Eletrobras/PROCEL, 2007.
- [4] GOMES, H. P. (Org.). Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2009.
- [5] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI); ELETROBRAS; PROCEL. Eficiência Energética na Indústria: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional. Brasília: CNI, 2010.
- [6] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- [7] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17094-1: Máquinas elétricas girantes – Motores de indução trifásicos – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [8] GIL, A. C. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- [9] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Eficiência Energética. Brasília: CNI, 2021. Cartilha.
- [10] WEG. Motores Elétricos Trifásicos Linha W22 – Catálogo Técnico Mercado Brasil. Jaraguá do Sul: WEG, 2022. Disponível em: <https://www.weg.net>. Acesso em: 13 set. 2025.
- [11] SCHNEIDER MOTOBOMBAS. Motobombas Centrífugas Monoestágio – Linha BC-92 S 1C – Catálogo Técnico. Joinville: Schneider Motobombas, 2017. Disponível em: <https://www.schneidermotobombas.com.br>. Acesso em: 13 set. 2025.

[12] VENTISILVA. Catálogo Técnico – Exaustores Centrífugos EC3 MAR/TAR. São Paulo: Ventisilva, 2023. Disponível em: <https://www.ventisilva.com.br>. Acesso em: 11 out. 2025.

[13] SCHNEIDER ELECTRIC. Altivar Machine ATV320 – Variable Speed Drives – Catálogo Técnico. Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2022. Disponível em: <https://www.se.com>. Acesso em: 11 out. 2025..

APÊNDICES

APÊNDICE A – Cotações utilizadas para estimativa de CAPEX

Este apêndice apresenta os valores de referência utilizados para estimar o investimento em capital (CAPEX) dos painéis de acionamento em regime contínuo, do tipo painel de partida direta (PD) e painel com inversor de frequência (VFD). As cotações foram obtidas em 2025, em distribuidores e lojas on-line de equipamentos elétricos, para produtos do portfólio Schneider Electric, e são empregadas apenas como referência para a comparação técnico-econômica desenvolvida no trabalho.

TABELA III. Valores de referência para os painéis de acionamento em regime contínuo (PD e VFD)

Painel	Equipamento	Modelo	Função Principal	Valor de referência (R\$)
PD	Disjuntor-motor	2,2	Proteção e seccionamento do motor	250,00
PD	Contator	1.760	Manobra do motor em categoria AC-3	300,00
PD	Relé térmico	880	Proteção contra sobrecarga	330,00
PD		3.950,00	Principais componentes do painel de partida direta	3950,00
VFD		3.070,00	Proteção e monitoramento do inversor	250,00
VFD		10.909	Acionamento com variação de velocidade (2,2 kW)	3700,00
VFD		5.758	Principais componentes do painel com inversor	3850,00

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com base nos valores unitários apresentados na Tabela III, adotam-se neste trabalho os seguintes investimentos aproximados:

- CAPEX painel PD $\approx$ R\$ 880,00
- CAPEX painel VFD $\approx$ R\$ 3.950,00

A diferença entre os dois arranjos é tratada como investimento adicional associado à adoção do inversor de frequência:

$$\Delta I \approx 3.950,00 - 880,00 \approx R\$3.070,00$$

Esse valor de $\Delta I \approx R\$3.070,00$ é utilizado nos cálculos de payback simples apresentados no corpo do trabalho.

APÊNDICE B – Exemplo de cálculo dos indicadores elétricos, energéticos e econômicos

Este apêndice apresenta, de forma resumida, um exemplo de cálculo dos principais indicadores utilizados no estudo (energia anual, custo anual, economia e payback), tomando como referência a aplicação da bomba centrífuga. Os cálculos do ventilador seguem o mesmo procedimento, com as premissas específicas dessa aplicação.

Exemplo – Bomba centrífuga (cenários PD e VFD) Dados adotados (bomba):

- Potência mecânica no eixo em PD:

$$P_{\text{eixo},1} \approx 2,0 \text{ kW}$$

- Rendimento do motor:

$$\eta_m \approx 0,88$$

- Rendimento do inversor:

$$\eta_{\text{VFD}} \approx 0,97$$

- Horas de operação: 16 h/dia
- Dias de operação: 300 dias/ano
- Tempo anual de operação:

$$t_{\text{anual}} = 16 \times 360 = 4.800 \text{ h/ano}$$

- Tarifa de energia: R\$0,80/kWh
- Operação com VFD: rotação média de 80 % da nominal ($n_2/n_1 = 0,8$)

A. Cenário com painel de partida direta operando em regime permanente (PD)

1. Potência elétrica média

$$P_{\text{el,PD}} = \frac{P_{\text{eixo},1}}{\eta_m} \approx \frac{2,0}{0,88} \approx 2,27 \text{ kW}$$

2. Energia anual

$$E_{\text{PD}} = P_{\text{el,PD}} \cdot t_{\text{anual}} \approx 2,27 \times 4.800 \approx 10.909 \text{ kWh/ano}$$

3. Custo anual de energia

$$C_{\text{PD}} = E_{\text{PD}} \cdot \text{Tarifa} \approx 10.909 \times 0,80 \approx R\$ 8.727,27/\text{ano}$$

B. Cenário com inversor de frequência (VFD)

1. Potência no eixo com rotação reduzida

Pela lei cúbica para cargas centrífugas:

$$\frac{P_{\text{eixo},1}}{P_{\text{eixo},2}} \approx \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 = (0,8)^3 \approx 0,51$$

$$P_{\text{eixo},2} \approx 0,51 \cdot 2,0 \approx 1,02 \text{ kW}$$

2. Potência elétrica média com VFD

$$P_{el,VFD} \approx \frac{\eta_m \cdot \eta_{VFD}}{P_{eixo,2}} \approx \frac{1,02}{0,88 \cdot 0,97} \approx 1,2kW$$

3. Energia anual

$$E_{VFD} = P_{el,VFD} \cdot t_{anual} \approx 1,20 \times 4.800 \approx 5.758kWh/ano$$

4. Custo anual de energia

$$C_{VFD} = E_{VFD} \cdot Tarifa \approx 5.758 \times 0,80 \approx R\$4.606,56/ano$$

C. Economia e payback – Bomba

1. Economia anual de energia

$$\Delta E = E_{PD} - E_{VFD} = 10.909 - 5.758 \approx 5.151kWh/ano$$

2. Economia anual de custo

$$\Delta C = C_{PD} - C_{VFD} \approx 8.727,27 - 4.606,56 \approx R\$4.120,71/ano$$

3. Payback simples

Usando o investimento adicional em painel com VFD ($\Delta I \approx R\$ 3.070,00$):

$$PB = \frac{\Delta I}{\Delta C} \approx \frac{3.070}{4.120,71} \approx 0,75 \text{ anos}$$

Os cálculos do ventilador seguem a mesma sequência de etapas, utilizando o tempo anual de operação correspondente, a razão de rotação adotada ($n_2/n_1 = 0,9$) e os valores de energia e custo que foram consolidados nas tabelas do Capítulo 4.

Exemplo – Ventilador centrífugo (cenários PD e VFD)

Dados adotados (bomba):

- Potência mecânica no eixo em PD:

$$P_{eixo,1} \approx 2,0kW$$

- Rendimento do motor:

$$\eta_m \approx 0,88$$

- Rendimento do inversor:

$$\eta_{VFD} \approx 0,97$$

- Horas de operação: 8 h/dia
- Dias de operação: 220 dias/ano

- Tempo anual de operação:

$$t_{anual} = 8 \times 220 = 1.760 \text{ h/ano}$$

- Tarifa de energia: R\$0,80/kWh
- Operação com VFD: rotação média de 90 % da nominal ($n_2/n_1 = 0,9$)

A. Cenário com painel de partida direta operando em regime permanente (PD)

1. Potência elétrica média

$$P_{el,PD} = 2,27 \text{ kW}$$

2. Energia anual

$$E_{PD} = P_{el,PD} \cdot t_{anual} \approx 2,27 \times 1.760 \approx 4.000 \text{ kWh/ano}$$

3. Custo anual de energia

$$C_{PD} = E_{PD} \cdot Tarifa \approx 4.000 \times 0,80 \approx R\$ 3.200,00/ano$$

B. Cenário com inversor de frequência (VFD)

1. Potência no eixo com rotação reduzida

Pela lei cúbica para cargas centrífugas:

$$\frac{P_{eixo,1}}{P_{eixo,2}} \approx \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 = (0,9)^3 \approx 0,73$$

$$P_{eixo,2} \approx 0,73 \cdot 2,0 \approx 1,46kW$$

2. Potência elétrica média com VFD

$$P_{el,VFD} \approx \frac{\eta_m \cdot \eta_{VFD}}{P_{eixo,2}} \approx \frac{1,46}{0,88 \cdot 0,97} \approx 1,71kW$$

3. Energia anual

$$E_{VFD} = P_{el,VFD} \cdot t_{anual} \approx 1,71 \times 1.760 \approx 3.006 \text{ kWh/ano}$$

4. Custo anual de energia

$$C_{VFD} = E_{VFD} \cdot Tarifa \approx 3.006 \times 0,80 \approx R\$2.404,95/ano$$

C. Economia e payback – Ventilado

1. Economia anual de energia

$$\Delta E = E_{PD} - E_{VFD} = 4.000 - 3.006 \\ \approx 994kWh/ano$$

2. Economia anual de custo

$$\Delta C = C_{PD} - C_{VFD} \approx 3.200 - 2.404,95 \\ \approx R\$795,05/ano$$

3. Payback simples

Usando o investimento adicional em painel com VFD
($\Delta I \approx R\$ 3.070,00$):

$$PB = \frac{\Delta I}{\Delta C} \approx \frac{3.070}{795,05} \approx 3,9 \text{ anos}$$

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante Pedro Rios Ribeiro Murad do Curso de Engenharia Elétrica matrícula 20251003800160, telefone (62) 9 8255-5808 e-mail Pedrorios2104@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “Partida Direta versus Inversor de Frequência: Análise Técnico-Econômica em Bombas e Ventiladores”, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 30 de outubro de 2025.

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: Pedro Rios Ribeiro Murad

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: