v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

APLICAÇÃO DE MOTORES SÍNCRONOS EM REFINADORES DE MASSA DE CELULOSE E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM PLANTAS INDUSTRIAIS

APPLICATION OF SYNCHRONOUS MOTORS IN PULP REFINERS AND THEIR CONTRIBUTION TO POWER FACTOR CORRECTION IN INDUSTRIAL PLANTS

APLICACIÓN DE MOTORES SÍNCRONOS EN REFINADORES DE PULPA DE CELULOSA Y SU CONTRIBUCIÓN A LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN PLANTAS INDUSTRIALES

Anderson Felipe da Silva[1], Valdecir Cardoso dos Santos[2], Daniel Ferreira Lima[3]

e7119301
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9301

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

A indústria de papel e celulose apresenta alto consumo de energia elétrica devido ao uso de equipamentos de alta potência e à operação contínua. Entre esses equipamentos, destacam-se os refinadores de massa de celulose, que exigem acionamentos robustos, estáveis e adequados às variações do processo de refinação. Nesse contexto, o presente artigo analisa, de forma teórica, a aplicação de motores síncronos em refinadores de massa de celulose e sua contribuição para a correção do fator de potência por meio da operação em regime superexcitado. A pesquisa foi desenvolvida a partir de revisão bibliográfica, normas técnicas e documentos regulatórios, com apoio de um exemplo de cálculo teórico, sem utilização de dados reais de operação de uma unidade industrial específica. São discutidos os conceitos de potência ativa, potência reativa e potência aparente; o funcionamento do motor síncrono; o sistema de excitação; a relação entre a corrente de armadura e a corrente de campo; a curva V; e os limites operacionais da máquina. No exemplo teórico, com valores nominais hipotéticos e operação superexcitada, calculou-se potência reativa em módulo de aproximadamente 955,4 kVAr, indicando possível contribuição capacitiva ao barramento. Esse resultado não comprova capacidade contínua de compensação, que depende dos limites operacionais da máquina. Conclui-se que a utilização de motores síncronos em refinadores pode contribuir para a melhoria das condições elétricas de operação e para a qualidade da energia elétrica em plantas industriais, desde que sejam respeitados os limites térmicos, elétricos e de estabilidade da máquina.

PALAVRAS-CHAVE: Motor síncrono. Refinador de massa. Fator de potência. Potência reativa. Operação superexcitada.

ABSTRACT

The pulp and paper industry has high electricity consumption due to the use of high-power equipment and continuous operation. Among this equipment, pulp refiners stand out because they require robust, stable drive systems capable of handling variations in the refining process. In this context, this article theoretically analyzes the application of synchronous motors in pulp refiners and their contribution to power factor correction through overexcited operation.

[1] Universidade de Araraquara, graduando em Engenharia Elétrica.

[2] Universidade de Araraquara (UNIARA) e Centro Universitário de Caratinga (UNEC), graduado em Engenharia Elétrica e Engenharia Civil; Faculdade Unyleya, especialista em Engenharia Elétrica e Eletrônica e Educação a Distância.

[3] Universidade de São Paulo (USP), doutor em Engenharia Elétrica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The study was based on a literature review, technical standards, and regulatory documents, supported by a theoretical calculation example, without using actual operating data from a specific industrial facility. The topics discussed include active, reactive, and apparent power; synchronous motor operation; excitation systems; the relationship between armature current and field current; V-curves; and the machine's operating limits. In the theoretical example, using hypothetical nominal values and assuming overexcited operation, a reactive power magnitude of approximately 955.4 kVAr was calculated, indicating a possible capacitive contribution to the busbar. This result does not demonstrate continuous reactive power compensation capability, which depends on the machine's operating limits. The study concludes that using synchronous motors in refiners may help improve electrical operating conditions and power quality in industrial plants, provided that the machine's thermal, electrical, and stability limits are respected.

KEYWORDS: *Synchronous motor. Pulp refiner. Power factor. Reactive power. Overexcited operation.*

RESUMEN
La industria de papel y celulosa presenta un alto consumo de electricidad debido al uso de equipos de gran potencia y a la operación continua. Destacan los refinadores de pulpa de celulosa, que requieren accionamientos robustos y estables ante las variaciones del proceso de refinación. El artículo analiza teóricamente la aplicación de motores síncronos en refinadores de pulpa de celulosa y su contribución a la corrección del factor de potencia mediante la operación sobreexcitada. La investigación se desarrolló mediante revisión bibliográfica, normas técnicas y documentos regulatorios, con un ejemplo de cálculo teórico y sin datos reales de operación de una instalación industrial específica. Se discuten la potencia activa, reactiva y aparente; el funcionamiento del motor síncrono; el sistema de excitación; la relación entre las corrientes de armadura y de campo; la curva en V; y los límites operativos de la máquina. En el ejemplo teórico, con valores nominales hipotéticos y operación sobreexcitada, se calculó una potencia reactiva de aproximadamente 955,4 kVAr en valor absoluto, lo que indica una posible contribución capacitiva a la barra de distribución. Este resultado no demuestra capacidad de compensación continua, que depende de los límites operativos de la máquina. Se concluye que el uso de motores síncronos en refinadores puede contribuir a mejorar las condiciones eléctricas de operación y la calidad de la energía eléctrica en plantas industriales, siempre que se respeten los límites térmicos, eléctricos y de estabilidad de la máquina.

PALABRAS CLAVE: *Motor síncrono. Refinador de pulpa. Factor de potencia. Potencia reactiva. Operación sobreexcitada.*

INTRODUÇÃO

A indústria de papel e celulose apresenta elevado consumo de energia elétrica devido à operação contínua de equipamentos de grande porte. Entre esses equipamentos, destacam-se os refinadores de massa de celulose, responsáveis pelo tratamento mecânico das fibras e considerados cargas de elevada demanda energética dentro da planta industrial (LIU *et al.*, 2020). Para o acionamento dessas máquinas, os motores síncronos podem ser utilizados como alternativa técnica eficiente, pois apresentam estabilidade operacional, elevado rendimento e capacidade de operar em aplicações de média e alta potência (CHAPMAN, 2013).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Esses motores também apresentam vantagens para o sistema elétrico industrial por meio do controle da excitação do rotor. Diferentemente dos motores de indução, as máquinas síncronas podem operar com diferentes condições de fator de potência. Isso significa que, dependendo do nível de excitação aplicado ao rotor, elas podem absorver ou fornecer potência reativa ao sistema elétrico (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Em regime superexcitado, o motor síncrono fornece potência reativa à instalação elétrica, atuando de forma semelhante a um compensador síncrono (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006). Esse comportamento contribui para a elevação do fator de potência da planta, melhora o aproveitamento da capacidade elétrica instalada e pode reduzir a dependência exclusiva de bancos de capacitores para compensação reativa (WEG, [s. d.]).

O fator de potência é um indicador importante do aproveitamento da energia elétrica em instalações industriais. Quando esse índice apresenta valores reduzidos, ocorre aumento da corrente circulante, o que eleva as perdas por efeito Joule, sobrecarrega transformadores e condutores e reduz a capacidade disponível do sistema elétrico (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006). No Brasil, a Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021 estabelece critérios relacionados ao fator de potência e ao faturamento de energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes, adotando como referência o valor de 0,92 para unidades consumidoras do grupo A (ANEEL, 2021).

O uso de motores síncronos em refinadores de massa de celulose associa a necessidade mecânica do processo ao suporte reativo da planta industrial. Essa aplicação é compatível com a literatura técnica da WEG ([s. d.]), que destaca a operação com fator de potência ajustável como uma característica relevante dessas máquinas.

Embora a literatura técnica já apresente a capacidade dos motores síncronos de controlar a potência reativa por meio da corrente de excitação, essa discussão geralmente ocorre de maneira mais ampla, sem aprofundamento em aplicações específicas, como os refinadores de massa de celulose. Nesse processo, o motor síncrono não atua somente como acionamento mecânico de elevada potência, mas também pode contribuir para o equilíbrio da potência reativa da instalação. Assim, este estudo se justifica pela análise dessa aplicação específica, considerando o uso do motor síncrono do refinador como recurso auxiliar para compensação reativa em plantas industriais.

A partir desse contexto, o trabalho busca responder à seguinte questão: de que forma a operação superexcitada de um motor síncrono aplicado a refinador de massa de celulose pode contribuir para a compensação de potência reativa da instalação, considerando os dados nominais adotados e os limites operacionais da máquina?

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O objetivo geral deste trabalho é analisar, de forma teórica, a aplicação de motores síncronos em refinadores de massa de celulose e sua contribuição para a correção do fator de potência em plantas industriais. Os objetivos específicos incluem apresentar os conceitos de fator de potência e potência reativa, explicar o funcionamento da máquina síncrona, demonstrar o princípio da operação superexcitada por meio da relação entre corrente de campo e corrente de armadura, representada pela curva V, e discutir sua contribuição para o fator de potência e para as condições elétricas de operação da instalação.

A análise considera que a operação superexcitada dos motores síncronos pode compensar parte da potência reativa do sistema elétrico, contribuindo para a elevação do fator de potência global e para a redução dos impactos associados à circulação de energia reativa. Com base na literatura técnica e normativa, o estudo examina a influência do controle da corrente de excitação sobre a potência reativa fornecida ou absorvida pela máquina síncrona (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

O artigo está organizado em introdução, referencial teórico, metodologia, resultados e discussão, considerações finais e referências. O referencial teórico apresenta os fundamentos sobre refinadores de massa de celulose, fator de potência, potência reativa, métodos de compensação e motores síncronos. A metodologia delimita o caráter teórico do estudo. A seção de resultados e discussão aplica esses conceitos à análise do motor síncrono em refinadores, incluindo um exemplo de cálculo da contribuição reativa em condição superexcitada.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Refinadores de massa de celulose

Os refinadores de massa de celulose são equipamentos utilizados no tratamento mecânico das fibras antes da formação do papel. O processo de refino busca modificar as características da massa, contribuindo para melhorar as condições de ligação entre as fibras e influenciando diretamente o desempenho do produto. Além da função tecnológica no processo produtivo, o refino também se destaca pelo consumo de energia elétrica, sendo uma etapa relevante do ponto de vista operacional e energético (LIU *et al.*, 2020).

Durante o processo de refino, a suspensão de fibras passa pela região de trabalho do refinador, composta por elementos móveis e estacionários. Nos refinadores de discos, as fibras são submetidas a esforços mecânicos entre as superfícies de refinação, os quais contribuem para alterar as características da massa e influenciar a potência exigida pelo equipamento. Essa relação entre condições do processo e demanda de potência é especialmente importante em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

refinadores de baixa consistência, nos quais variáveis operacionais podem modificar o comportamento energético do sistema (LIU *et al.*, 2020; RUBIANO BERNA; MARTINEZ; OLSON, 2019).

Uma variável importante desse processo é a folga mecânica entre os elementos do rotor e do estator do próprio refinador. Rubiano Berna, Martinez e Olson (2019) analisam a relação entre a potência de refino e a folga mecânica em refinadores de baixa consistência, destacando que essa relação depende de fatores como tamanho do refinador, tipo de polpa, padrão das placas e condições de operação.

A energia consumida pelo refinador resulta tanto do trabalho direto aplicado à massa quanto do próprio funcionamento da máquina. Como mostram Liu *et al.* (2020), as propriedades da polpa e as variáveis do processo alteram diretamente a demanda de energia em refinadores de baixa consistência. Assim, o refinador pode ser entendido como uma carga industrial expressiva, cujo consumo varia conforme as condições da linha de produção.

Essas variações do processo também se refletem no acionamento elétrico do refinador. Alterações na consistência da massa, na folga mecânica e nas condições das superfícies de refino podem modificar a potência mecânica requerida e o torque resistente aplicado ao eixo. Por isso, o motor utilizado nessa aplicação deve apresentar estabilidade operacional diante de variações de carga, sem comprometer a continuidade do processo (LIU *et al.*, 2020; RUBIANO BERNA; MARTINEZ; OLSON, 2019; CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Por exigir potência elevada, estabilidade de velocidade e confiabilidade operacional, o refinador demanda um sistema de acionamento robusto. Nessa aplicação, o motor síncrono pode ser considerado uma alternativa relevante, pois, além de atender ao acionamento mecânico, permite o controle da excitação do rotor e pode contribuir para o controle da potência reativa e do fator de potência da instalação (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, [s. d.]; WEG, 2026).

1.2. Fator de potência e potência reativa

O fator de potência é um importante indicador do aproveitamento da energia elétrica em sistemas elétricos industriais. De acordo com Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006), ele corresponde à relação entre a potência ativa e a potência aparente, indicando a parcela da potência fornecida que está associada à potência ativa consumida pela carga.

Em corrente alternada, a análise da potência envolve as grandezas ativa, reativa e aparente. A potência ativa corresponde à taxa de transferência de energia efetivamente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

convertida em trabalho ou outras formas de energia. A potência reativa, representada por Q e medida em volt-ampère reativo (VAr), está associada à criação e manutenção de campos elétricos e magnéticos em equipamentos como motores e transformadores. Já a potência aparente, representada por S e medida em volt-ampère (VA), corresponde à combinação vetorial das potências ativa e reativa (CHAPMAN, 2013).

A Tabela 1 sintetiza as principais relações utilizadas para o cálculo das potências e do fator de potência em sistemas trifásicos.

Tabela 1. Relações utilizadas para cálculo das potências e do fator de potência

Fórmula	Descrição	Aplicação
$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi$	Potência ativa em sistema trifásico.	Determinar a potência útil consumida pela carga.
$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \text{sen}\varphi$	Potência reativa em sistema trifásico.	Calcular a parcela associada aos campos elétricos e magnéticos.
$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I$	Potência aparente em sistema trifásico.	Dimensionamento da carga total solicitada do sistema.
$FP = P / S = \cos\varphi$	Fator de potência.	Avaliar o aproveitamento da energia elétrica.
$S^2 = P^2 + Q^2$	Relação do triângulo de potências.	Relacionar potência ativa, reativa e aparente.
$Q = P \cdot \tan(\cos^{-1}(FP))$	Potência reativa a partir de P e FP.	Estimar o reativo associado a uma condição de fator de potência.

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em Chapman (2013) e Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006).

Adotando a convenção usual de cargas, a potência reativa (Q) é considerada positiva quando absorvida da rede, caracterizando comportamento indutivo, e negativa quando fornecida ao sistema, caracterizando comportamento capacitivo. Assim, o sinal de Q depende de a carga absorver ou fornecer potência reativa à instalação elétrica (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Nas instalações industriais, a presença de cargas indutivas, como motores elétricos, transformadores e outros equipamentos eletromagnéticos, provoca consumo de potência reativa e pode reduzir o fator de potência. Essa condição aumenta a corrente circulante no sistema, eleva as perdas por efeito Joule, contribui para o aquecimento de cabos e transformadores e reduz a capacidade disponível da rede elétrica (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021 define energia elétrica reativa como aquela que circula entre campos elétricos e magnéticos em um sistema de corrente alternada sem produzir trabalho. A mesma resolução também estabelece o fator de potência como a razão entre a energia elétrica ativa e a composição vetorial das energias ativa e reativa medidas em um mesmo período (ANEEL, 2021).

Ainda conforme a REN ANEEL nº 1.000/2021, o grupo A corresponde às unidades consumidoras com conexão em tensão maior ou igual a 2,3 kV, ou atendidas por sistema subterrâneo de distribuição em tensão menor que 2,3 kV. O grupo B, por sua vez, corresponde às unidades consumidoras conectadas em tensão menor que 2,3 kV. Como a aplicação discutida neste trabalho envolve motores industriais de média tensão aplicados em refinadores de grande porte, a análise é associada conceitualmente ao grupo A, sem definir subgrupo tarifário específico, uma vez que não são utilizados contrato, fatura ou dados reais de uma planta industrial.

Para consumidores do grupo A, a REN ANEEL nº 1.000/2021 estabelece o fator de potência de referência fR = 0,92, indutivo ou capacitivo, para apuração de energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes (ANEEL, 2021). De forma simplificada, o valor correspondente à energia elétrica reativa excedente pode ser representado pela expressão:

$$\mathbf{ERE = \Sigma\,[EEAMT \cdot (fR / fT - 1)] \cdot VRERE}$$

Em que ERE corresponde ao valor da energia elétrica reativa excedente; EEAMT representa a energia elétrica ativa medida em cada intervalo; fR é o fator de potência de referência; fT é o fator de potência medido; e VRERE corresponde ao valor de referência aplicado à energia reativa excedente (ANEEL, 2021). Essa formulação reforça a importância técnica e econômica da correção do fator de potência em instalações industriais.

1.3. Métodos de compensação de potência reativa

Nesse contexto, torna-se tecnicamente relevante a utilização de métodos de compensação de potência reativa para melhoria do fator de potência das instalações industriais. Entre as soluções utilizadas, destacam-se bancos de capacitores, compensadores síncronos e motores síncronos operando em regime superexcitado. Essas alternativas não são necessariamente excludentes, pois podem atuar de forma complementar em uma mesma planta industrial.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre métodos de compensação de potência reativa utilizados em instalações industriais.

Tabela 2. Comparação entre métodos de compensação de potência reativa

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Solução	Características principais	Limitações
Banco de capacitores	Solução estática, de instalação relativamente simples e muito utilizada para fornecimento de potência reativa capacitiva.	Pode apresentar degraus de compensação, risco de ressonância com harmônicos e menor flexibilidade dinâmica.
Compensador síncrono	Máquina síncrona operando sem carga mecânica, capaz de fornecer ou absorver potência reativa por controle de excitação.	Exige equipamento dedicado, manutenção eletromecânica e espaço físico.
Motor síncrono superexcitado	Aproveita o próprio motor de processo para acionar a carga e fornecer potência reativa ao barramento.	Depende da condição de carga, dos limites térmicos, da corrente de armadura e da capacidade do sistema de excitação.

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em Miller (1982), Chapman (2013), Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006), WEG ([s. d.]) e WEG (2026).

A escolha da solução está relacionada ao perfil de carga, ao nível de tensão, à variação da demanda, à presença de geração própria, à sensibilidade a harmônicos e aos custos de implantação e manutenção. Em instalações que já utilizam motores síncronos de grande porte, a operação superexcitada pode ser aproveitada como parte da estratégia de compensação reativa, desde que sejam respeitados os limites operacionais da máquina, como a corrente de armadura, a corrente de campo, o aquecimento e a capacidade do sistema de excitação (MILLER, 1982; CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, [s. d.]; WEG, 2026).

1.4. Motores síncronos

Os motores síncronos são máquinas elétricas utilizadas principalmente em aplicações de média e alta potência, nas quais se busca elevada eficiência, estabilidade de rotação e possibilidade de controle do fator de potência. Diferentemente dos motores de indução, o rotor do motor síncrono gira na mesma velocidade do campo magnético produzido pelo estator, sem apresentar escorregamento em regime permanente. Quando alimentado diretamente por uma rede de frequência fixa, o motor opera com velocidade síncrona determinada pela frequência da rede e pelo número de polos da máquina (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

O estator possui enrolamentos trifásicos alimentados em corrente alternada, responsáveis pela formação do campo magnético girante. O rotor possui um enrolamento de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

campo alimentado em corrente contínua, que produz um campo magnético próprio. Durante a operação, o campo do rotor se mantém sincronizado com o campo girante do estator, permitindo que a máquina desenvolva torque e mantenha a velocidade diretamente relacionada à frequência da rede e ao número de polos (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

A velocidade síncrona é determinada pela relação ns = 120 · f / p, em que ns é a velocidade síncrona em rotações por minuto, f é a frequência da rede em hertz e p é o número de polos da máquina (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006). Essa característica é importante em refinadores de massa, pois a estabilidade de rotação contribui para manter uma condição de refinação mais uniforme, reduzindo variações indesejadas associadas ao acionamento do equipamento.

Quando a carga aplicada ao eixo do motor aumenta, o rotor tende a se deslocar angularmente em relação ao campo magnético girante do estator. Esse deslocamento é representado pelo ângulo de carga ou de torque. Enquanto o motor permanecer dentro dos limites de estabilidade, o aumento da carga modifica esse ângulo sem alterar sua velocidade de rotação, que permanece sincronizada com o campo do estator. Esse comportamento é importante nos refinadores, pois a manutenção de uma rotação praticamente constante contribui para a estabilidade do processo.

Para entrar em funcionamento, o motor síncrono precisa que o rotor seja acelerado até uma condição próxima da velocidade síncrona. Em motores síncronos industriais, essa etapa pode ocorrer por meio de enrolamentos amortecedores, permitindo a partida de forma semelhante à de um motor de indução, até que a excitação em corrente contínua seja aplicada ao rotor e a máquina entre em sincronismo com o campo girante do estator. Embora existam aplicações em que conversores eletrônicos de frequência sejam utilizados para partida ou controle de velocidade, essa condição não é adotada como foco neste trabalho. Assim, a análise considera o motor síncrono operando em regime permanente, com velocidade vinculada à frequência de alimentação e ao número de polos da máquina (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, 2026).

Além do acionamento mecânico, uma característica importante desse tipo de máquina é a possibilidade de controlar a troca de potência reativa com o sistema elétrico por meio da corrente de excitação. Dessa forma, um mesmo motor pode trabalhar com fator de potência indutivo, próximo da unidade ou capacitivo, de acordo com a condição de excitação utilizada (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.5. Sistema de excitação, corrente de campo e operação superexcitada

O sistema de excitação do motor síncrono é responsável por fornecer corrente contínua ao enrolamento de campo do rotor. Essa corrente cria o campo magnético necessário para o funcionamento da máquina e influencia diretamente a troca de potência reativa com o sistema elétrico. Por esse motivo, a excitação está relacionada tanto à formação do campo magnético do rotor quanto ao controle do fator de potência do motor (CHAPMAN, 2013; WEG, 2026).

Entre as formas de excitação utilizadas em máquinas síncronas estão os sistemas com escovas e anéis coletores e os sistemas sem escovas, conhecidos como brushless. Nos sistemas com escovas, a corrente contínua proveniente de uma fonte externa é transferida ao enrolamento de campo do rotor por meio de anéis coletores e escovas. Esse sistema permite acesso direto ao circuito de campo, porém possui componentes sujeitos a desgaste e que necessitam de inspeção e manutenção periódica.

No sistema brushless, a corrente de campo é obtida por meio de uma excitatriz instalada no próprio eixo da máquina. A excitatriz gera corrente alternada em sua parte girante, que é retificada por um conjunto de diodos rotativos, fornecendo corrente contínua ao enrolamento de campo do rotor principal. Ruuskanen *et al.* (2009) descrevem esse sistema como um conjunto formado pela máquina excitatriz e por uma ponte retificadora de diodos montada na parte girante, responsável por alimentar o campo do rotor; descrição semelhante é apresentada no manual técnico da WEG para motores síncronos brushless (WEG, 2026).

A principal diferença em relação ao sistema com escovas é que não existe contato elétrico deslizante para alimentar continuamente o campo do rotor. A eliminação das escovas reduz pontos sujeitos a desgaste, característica importante em máquinas industriais de grande porte e operação contínua. Por outro lado, como os elementos do circuito de campo estão localizados na parte girante, o diagnóstico e a medição direta de algumas grandezas podem exigir recursos específicos do sistema de excitação (RUUSKANEN *et al.*, 2009; WEG, 2026).

De acordo com o nível de corrente de campo, o motor síncrono pode operar subexcitado, próximo ao fator de potência unitário ou superexcitado. A corrente de armadura circula nos enrolamentos do estator, enquanto a corrente de campo circula no enrolamento do rotor e determina o nível de excitação da máquina. Para uma carga mecânica aproximadamente constante, a potência ativa requerida pelo motor permanece associada principalmente ao trabalho mecânico desenvolvido e às perdas da máquina. Nessa condição, a variação da corrente de campo modifica sobretudo a corrente de armadura, o fator de potência e a potência reativa trocada com o sistema (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, 2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A ABNT NBR 5052 define a característica em V como o gráfico da corrente da armadura em função da corrente de excitação, para cargas constantes e fator de potência variável. Essa curva apresenta um ponto de mínima corrente da armadura, correspondente ao fator de potência unitário para determinada carga. À esquerda desse ponto, o motor opera subexcitado e tende a absorver potência reativa; à direita, com o aumento da corrente de campo, passa a operar superexcitado, apresentando comportamento capacitivo e podendo fornecer potência reativa ao barramento (ABNT, 1984; CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Na operação superexcitada, o fornecimento local de potência reativa pode compensar parte da potência reativa consumida por motores de indução, transformadores e outras cargas indutivas instaladas no mesmo barramento. Com isso, a corrente total solicitada da fonte pode ser reduzida para uma mesma potência ativa, diminuindo perdas elétricas e liberando capacidade em transformadores, cabos e equipamentos de manobra (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, [s. d.]).

Essa característica é relevante para o presente estudo, pois os motores síncronos dos refinadores já são necessários para o acionamento mecânico do processo. Dessa forma, quando as condições de operação e os limites da máquina permitem, a excitação pode ser ajustada para que o motor também participe do equilíbrio de potência reativa do barramento, sem deixar de cumprir sua função principal de acionamento (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, [s. d.]).

1.6. Curva de capabilidade e limites operacionais

Apesar da vantagem da operação superexcitada, a excitação não pode ser aumentada sem limite. A operação do motor deve respeitar os limites térmicos do enrolamento de campo e do estator, a corrente nominal da máquina, a capacidade do sistema de excitação e a estabilidade eletromecânica. Dessa forma, a quantidade de potência reativa fornecida deve permanecer dentro da capacidade especificada para o motor e para seu sistema de excitação (CHAPMAN, 2013; IEEE, 2020; WEG, 2026).

A curva de capabilidade representa, de forma simplificada, a região de operação admissível de uma máquina síncrona no plano potência ativa e potência reativa. Embora seja frequentemente discutida em geradores, o conceito também é útil para motores síncronos quando se avalia a capacidade de fornecer ou absorver potência reativa. O limite de corrente do estator está relacionado ao aquecimento dos enrolamentos da armadura; o limite de corrente de campo está associado ao aquecimento do rotor; e os limites de estabilidade indicam a margem segura de operação em relação ao sincronismo da máquina (KUNDUR, 1994).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A IEEE Std 115-2019 apresenta procedimentos de ensaio para máquinas síncronas, incluindo motores, geradores e compensadores síncronos, e destaca a importância de instrumentação adequada e práticas seguras na obtenção das características de desempenho (IEEE, 2020). Neste trabalho, a norma é utilizada como referência técnica para reforçar que a avaliação completa de uma máquina síncrona depende de ensaios, condições nominais e procedimentos adequados, ainda que a análise aqui desenvolvida seja de natureza teórica.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido por meio de pesquisa teórica, bibliográfica e documental. O estudo aborda o uso de motores síncronos em refinadores de massa de celulose e sua relação com a correção do fator de potência em plantas industriais. A análise foi construída a partir de fundamentos de máquinas elétricas, sistemas de potência, compensação de potência reativa e refino de baixa consistência.

Para a revisão bibliográfica foram utilizados livros técnicos, normas, documentos regulatórios, manuais de fabricante e artigos científicos relacionados ao tema. As referências foram escolhidas conforme sua pertinência para os assuntos tratados no artigo, especialmente funcionamento do motor síncrono, sistema de excitação, operação superexcitada, curva V, limites operacionais, fator de potência e consumo de energia em refinadores. Também foram utilizadas publicações sobre refino de baixa consistência, por tratarem da influência das condições do processo na potência solicitada pelo equipamento.

A busca das fontes considerou termos em português e em inglês, como motores síncronos, potência reativa, fator de potência, operação superexcitada, curva V, sistema de excitação, refinadores de massa de celulose. Para o processo de refinação, normas, manuais e aspectos regulatórios, foram priorizados materiais mais recentes. No caso dos fundamentos de máquinas elétricas e sistemas de potência, também foram mantidas obras clássicas, pois esses conceitos continuam válidos para a discussão proposta.

Não foram utilizados dados reais de operação de uma unidade industrial específica. Da mesma forma, o estudo não emprega registros de supervisório, medições em campo, faturas de energia ou informações contratuais de consumidores. Os valores nominais empregados na Tabela 3 foram adotados de forma hipotética, apenas para compor um exemplo de cálculo teórico. Esses valores foram definidos por serem compatíveis com um motor síncrono trifásico industrial de média tensão e elevada potência, aplicável a cargas de grande porte, como refinadores de massa de celulose.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Na etapa de análise, relacionou-se o ajuste da corrente de excitação do motor síncrono com a potência reativa trocada entre a máquina e o sistema elétrico. Foram utilizadas as relações do triângulo de potências e as expressões usuais de potência em sistemas trifásicos. Com base nessas relações, estimaram-se a potência aparente, a potência ativa de entrada, o rendimento aproximado e a potência reativa associada à condição considerada. O cálculo busca demonstrar o princípio da operação superexcitada, considerando que, em uma aplicação real, devem ser respeitados os limites de corrente, aquecimento, excitação e estabilidade da máquina.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Aplicação teórica do motor síncrono no refinador de massa

O refinador de massa de celulose representa uma carga de processo que combina elevada potência mecânica, operação contínua e variações associadas às condições de refinação. A potência solicitada pode variar conforme a consistência da massa, a abertura entre os discos ou placas, o tipo de fibra e a condição das superfícies de refino. Por esse motivo, o acionamento deve ser capaz de manter estabilidade e confiabilidade durante longos períodos de operação (LIU *et al.*, 2020; RUBIANO BERNA; MARTINEZ; OLSON, 2019).

O motor síncrono atende a essas necessidades por operar em velocidade constante em regime permanente e por apresentar capacidade de controle do fator de potência. Enquanto sua função principal é fornecer torque ao refinador, seu sistema de excitação permite ajustar a troca de potência reativa com o sistema elétrico. Dessa forma, a máquina deixa de ser vista apenas como acionamento mecânico e passa a ter importância também no desempenho elétrico da planta (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, [s. d.]).

Na análise teórica, a aplicação desse motor pode ser interpretada como a combinação de dois papéis fundamentais para o processo: o papel mecânico, associado ao fornecimento de potência e torque ao refinador, e o papel elétrico, associado ao controle da potência reativa por meio da excitação. Essa dupla função justifica o estudo dos motores síncronos em refinadores de massa de celulose, especialmente em instalações industriais com grande presença de cargas indutivas (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, [s. d.]).

3.2. Controle de potência reativa em planta com geração própria

Em plantas industriais que possuem geração local, operando em paralelo com a rede da concessionária, parte da potência ativa pode ser fornecida por geradores internos e parte pode

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ser recebida da rede externa. Além da potência ativa, também deve ser controlada a circulação de potência reativa, pois ela influencia correntes, perdas, carregamento de transformadores e fator de potência global da instalação (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; ANEEL, 2021).

Os geradores síncronos participam do controle de potência reativa por meio de seus próprios sistemas de excitação. Quando a planta apresenta elevada demanda de reativos, os geradores podem ser mais exigidos em corrente de estator e corrente de campo, o que aumenta perdas e aquecimento. Nesse cenário, a compensação reativa distribuída próxima às cargas indutivas pode reduzir a circulação de reativo pelo sistema interno (KUNDUR, 1994; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

O motor síncrono instalado no refinador pode contribuir nesse equilíbrio quando opera em regime superexcitado. Nessa condição, ele fornece potência reativa ao barramento em que está conectado, compensando parte da demanda das cargas indutivas próximas. Com isso, reduz-se a parcela de reativo que precisaria ser fornecida pelos geradores internos, bancos de capacitores ou pela própria rede da concessionária (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, [s. d.]).

3.3. Relação entre excitação, fator de potência e potência reativa

A contribuição do motor síncrono para a correção do fator de potência depende diretamente do ajuste da corrente de excitação. Para uma determinada carga mecânica, a potência ativa absorvida pelo motor permanece associada ao trabalho realizado no refinador e às perdas da máquina. Entretanto, ao variar a corrente de campo, altera-se a corrente de armadura e a componente reativa da corrente do estator (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, 2026).

Quando o motor está subexcitado, a corrente de armadura se atrasa em relação à tensão terminal e a máquina absorve potência reativa, apresentando comportamento semelhante ao de uma carga indutiva. Quando a excitação é ajustada para a condição de menor corrente de armadura, o fator de potência se aproxima da unidade. Quando a excitação é elevada acima desse ponto, a corrente passa a adiantar a tensão, e o motor fornece potência reativa ao sistema, caracterizando a operação superexcitada (ABNT, 1984; CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Essa relação pode ser sintetizada da seguinte forma: a corrente de excitação controla o campo magnético do rotor; o campo do rotor altera a tensão interna da máquina; a tensão interna modifica a defasagem entre tensão e corrente do estator; e essa defasagem determina a potência

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

reativa absorvida ou fornecida pelo motor. Assim, o controle da excitação atua diretamente sobre o fator de potência (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, 2026).

3.4. Modelo teórico de cálculo da potência reativa

A contribuição reativa de um motor síncrono pode ser estimada, em uma análise teórica, por meio das relações do triângulo de potências. Conhecendo-se a potência ativa P e o fator de potência de operação FP, a potência aparente S pode ser calculada por S = P/FP. Em seguida, a potência reativa pode ser determinada por $Q = P \cdot \tan(\cos^{-1}(FP))$ (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Quando o fator de potência é atrasado, o valor de Q representa potência reativa absorvida da rede. Quando o fator de potência é adiantado, em condição superexcitada, o mesmo valor de módulo representa potência reativa fornecida ao barramento. Assim, sem depender de dados reais de operação, é possível demonstrar teoricamente que a variação do fator de potência do motor altera diretamente a quantidade de potência reativa trocada com o sistema (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Em uma aplicação industrial com vários motores síncronos, a contribuição total pode ser estimada pela soma das contribuições individuais de cada máquina, desde que sejam conhecidas suas potências, fatores de potência de operação e limites de excitação. De forma genérica, pode-se escrever $Q_{total} = \Sigma Q_i$, em que Q_i representa a potência reativa fornecida ou absorvida por cada motor síncrono conectado ao barramento (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Para complementar o modelo de cálculo, apresenta-se um exemplo de cálculo teórico com valores nominais hipotéticos, compatíveis com um motor síncrono trifásico industrial de média tensão e elevada potência. Os dados são utilizados apenas como exemplo, sem representar medição real de operação, curva de carga, faturamento de energia ou condição específica de uma planta industrial. As relações utilizadas seguem o triângulo de potências e as expressões de potência em sistemas trifásicos, já apresentadas anteriormente neste trabalho (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Os dados adotados para o exemplo de cálculo teórico são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados adotados para o exemplo de cálculo teórico

Parâmetro	Valor adotado
Potência mecânica de saída (Pout)	1650 CV ≈ 1213,5 kW
Tensão nominal de linha (V1n)	4160 V

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Corrente nominal do estator (I1n)	221 A
Frequência nominal (fn)	60 Hz
Rotação nominal (n)	514 rpm
Fator de potência	cos φ = 0,8
Condição assumida para este exemplo de cálculo	Operação superexcitada, com fator de potência adiantado

Fonte: Elaborado pelos autores, com valores nominais hipotéticos adotados para exemplo de cálculo teórico.

Para fins deste exemplo, foi adotada a hipótese de operação superexcitada, na qual o motor síncrono apresenta comportamento capacitivo e pode fornecer potência reativa ao barramento. Essa hipótese é compatível com a aplicação de motores síncronos na correção do fator de potência, desde que respeitados os limites elétricos, térmicos e operacionais da máquina (WEG, [s. d.]; WEG, 2026).

A potência aparente nominal associada ao estator pode ser estimada pela expressão trifásica:

$$\mathbf{Sn = (\sqrt{3} \cdot V1n \cdot I1n) / 1000}$$

Substituindo os valores adotados:

$$\mathbf{Sn = (\sqrt{3} \cdot 4160 \cdot 221) / 1000}$$
$$\mathbf{Sn \approx 1592,3\ kVA}$$

Considerando o fator de potência adotado, cos φ = 0,8, a potência ativa elétrica de entrada é obtida por:

$$\mathbf{Pin = Sn \cdot \cos \varphi}$$
$$\mathbf{Pin = 1592,3 \cdot 0,8}$$
$$\mathbf{Pin \approx 1273,8\ kW}$$

A partir da potência mecânica de saída adotada, pode-se estimar o rendimento nominal aproximado da máquina:

$$\mathbf{\eta = (Pout / Pin) \cdot 100}$$
$$\mathbf{\eta = (1213,5 / 1273,8) \cdot 100}$$
$$\mathbf{\eta \approx 95,3\%}$$

Esse rendimento é apenas estimativo, pois foi calculado com base nos valores nominais adotados para o exemplo, e não a partir de ensaio específico de rendimento da máquina.

O ângulo associado ao fator de potência é dado por:

$$\mathbf{\varphi = \cos^{-1}(0,8)}$$
$$\mathbf{\varphi \approx 36,87°}$$

A potência reativa associada à condição nominal pode ser determinada pela componente reativa do triângulo de potências:

$$\mathbf{Qn = Sn \cdot \operatorname{sen} \varphi}$$

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$Qn = 1592,3 \cdot sen(36,87°)$$
$$sen(36,87°) \approx 0,60$$
$$Qn = 1592,3 \cdot 0,60$$
$$Qn \approx 955,4 \text{ kVAr}$$

Como os valores adotados têm finalidade exclusivamente teórica, o fator de potência de 0,8 é utilizado inicialmente para determinar o módulo da potência reativa associada à condição nominal considerada. Considerando a operação com fator de potência de 0,8 adiantado, o módulo da potência reativa calculada corresponde a aproximadamente 955,4 kVAr. Nessa hipótese, o motor é interpretado como operando em condição superexcitada, apresentando comportamento capacitivo em relação ao barramento. Pela convenção usual de cargas, essa contribuição pode ser representada com sinal negativo:

$$Q_{motor} \approx -955,4 \text{ kVAr}$$

Assim, o exemplo de cálculo demonstra que, além de fornecer potência mecânica ao eixo para acionamento da carga, o motor síncrono pode contribuir para a compensação de potência reativa quando operado em condição superexcitada. Considerando hipoteticamente a operação com fator de potência de 0,8 adiantado, o módulo da potência reativa calculada corresponde a aproximadamente 955,4 kVAr. Esse resultado não representa capacidade comprovada de compensação contínua de um motor real. A viabilidade dessa condição operacional depende da verificação dos limites de corrente de campo, corrente de armadura, aquecimento e capabilidade da máquina, com base em dados técnicos do fabricante, ensaios e comissionamento do sistema.

3.5. Discussão técnica da aplicação

A utilização do motor síncrono superexcitado como elemento auxiliar de compensação reativa apresenta a vantagem de aproveitar um equipamento já necessário ao processo produtivo. Em refinadores de massa, o motor é indispensável para o acionamento mecânico; portanto, sua capacidade de controle de potência reativa pode ser utilizada como benefício adicional para a instalação elétrica. Diferentemente dos bancos de capacitores, que fornecem potência reativa capacitiva de forma estática ou por estágios de compensação, o motor síncrono permite ajustar a troca de potência reativa por meio da corrente de excitação. Já os compensadores síncronos são equipamentos dedicados ao controle de reativos, mas exigem instalação própria, espaço físico e manutenção específica. Assim, o motor síncrono aplicado ao refinador pode combinar o acionamento mecânico da carga com a compensação reativa, desde que sejam respeitados seus limites operacionais (MILLER, 1982; CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; WEG, [s. d.]; WEG, 2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Essa estratégia, entretanto, não elimina a necessidade de outros métodos de compensação. Bancos de capacitores, compensadores síncronos, geradores síncronos e motores síncronos podem atuar de forma complementar, dependendo do perfil de carga, do nível de tensão, da presença de geração própria e das condições operacionais da planta. O motor síncrono superexcitado deve ser entendido como parte de uma estratégia integrada de controle de potência reativa, e não como solução isolada para todas as condições de operação (MILLER, 1982; CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Também deve ser considerado o risco de sobrecompensação. Quando a potência reativa capacitiva fornecida ultrapassa a necessidade da instalação, o fator de potência global pode se tornar capacitivo, condição que nem sempre é desejável do ponto de vista operacional. Em plantas com geração própria, bancos de capacitores automáticos, geradores síncronos e motores síncronos operando em regime superexcitado, torna-se necessário coordenar os equipamentos responsáveis pelo controle de tensão e potência reativa. Essa coordenação evita circulação desnecessária de reativos, variações de tensão e operação fora da faixa adequada de fator de potência da instalação (ANEEL, 2021; KUNDUR, 1994; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; IEEE, 2020; WEG, 2026).

Outro ponto importante é que o fornecimento de potência reativa pelo motor não deve comprometer sua função principal de acionamento do refinador. O aumento da corrente de excitação eleva perdas no circuito de campo e pode aumentar a temperatura do rotor. Além disso, a corrente de armadura deve permanecer dentro dos limites admissíveis, pois o estator é submetido à soma vetorial das componentes ativa e reativa. Por isso, a curva V e a curva de capabilidade devem ser consideradas na definição da faixa segura de operação (ABNT, 1984; CHAPMAN, 2013; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; IEEE, 2020; WEG, 2026).

Dessa forma, a análise teórica e o exemplo de cálculo indicam que motores síncronos aplicados a refinadores de massa de celulose podem operar em condição de superexcitação e contribuir para a correção do fator de potência, desde que respeitados seus limites operacionais. Essa contribuição, porém, deve ser avaliada com base em critérios técnicos, normativos e operacionais. Em estudos futuros, a aplicação prática pode ser complementada por medições de campo, pelo levantamento da curva V real, pela análise dos limites de excitação, pela verificação da curva de capabilidade e pela comparação com alternativas de compensação (ABNT, 1984; IEEE, 2020; WEG, 2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como propósito analisar, em abordagem teórica, a aplicação de motores síncronos no acionamento de refinadores de massa de celulose e sua contribuição para a correção do fator de potência em plantas industriais. A partir do estudo desenvolvido, foi possível compreender que essa aplicação não deve ser vista apenas como uma escolha de acionamento mecânico, mas como parte de uma estratégia elétrica mais ampla dentro da instalação.

No caso dos refinadores, o elevado consumo de potência, a necessidade de continuidade operacional e a importância da estabilidade de rotação tornam o acionamento por motor síncrono uma alternativa tecnicamente relevante. O refinador é uma carga de grande impacto no sistema elétrico da planta e, por isso, a seleção do motor influencia tanto o processo produtivo quanto o comportamento energético da instalação.

No acionamento do refinador, a corrente de excitação do motor pode ser ajustada de acordo com a condição de operação. Esse ajuste interfere no fator de potência da máquina. Com o motor superexcitado, há fornecimento de potência reativa ao barramento, o que pode reduzir parte da demanda reativa provocada pelas cargas indutivas da instalação. Ao mesmo tempo, o motor continua desempenhando sua função mecânica de acionar o refinador.

O motor síncrono pode contribuir para a compensação de potência reativa, mas essa atuação não é ilimitada. O valor que pode ser fornecido depende principalmente dos limites de corrente de armadura e de campo, do aquecimento da máquina e da capacidade do sistema de excitação. Também é necessário manter a máquina dentro de sua faixa estável de operação. Dessa forma, a utilização da superexcitação deve considerar os limites reais do motor e as condições da instalação.

O uso do motor síncrono no refinador não elimina a necessidade de outras formas de compensação de potência reativa. Dependendo das características da instalação e do comportamento das cargas, também podem ser utilizados bancos de capacitores, compensadores síncronos ou outros equipamentos destinados a esse fim. No caso estudado, a vantagem do motor síncrono está em permitir o acionamento mecânico do refinador e, ao mesmo tempo, participar do controle de potência reativa do sistema elétrico.

O estudo mostrou que o motor síncrono do refinador pode desempenhar duas funções: acionar mecanicamente a carga e auxiliar, em uma análise teórica, na compensação de potência reativa por meio do controle da excitação. No exemplo de cálculo desenvolvido, considerando os valores nominais hipotéticos adotados e a operação com fator de potência de 0,8 adiantado,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

obteve-se potência reativa em módulo de aproximadamente 955,4 kVAr. Esse resultado não comprova a capacidade real de compensação contínua de uma instalação industrial, pois não foram realizadas medições de campo, comprovação experimental, avaliação econômica ou determinação da capacidade efetiva da máquina. Em uma etapa futura, o levantamento de dados reais do motor, da curva V, da curva de capabilidade e das condições elétricas da planta permitirá verificar com maior segurança quanto de potência reativa pode ser fornecido nas condições reais de operação.

REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 5052: máquina síncrona: ensaios*. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ANEEL. *Resolução Normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021*. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf. Acesso em: 13 out. 2026.

CHAPMAN, Stephen J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FITZGERALD, Arthur Eugene; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. *Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

IEEE. *IEEE Std 115-2019: IEEE guide for test procedures for synchronous machines including acceptance and performance testing and parameter determination for dynamic analysis*. New York: IEEE, 2020. DOI: 10.1109/IEEESTD.2020.9050934.

KUNDUR, Prabha. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994.

LIU, Huan; DONG, Jixian; QI, Kai; GUO, Xiya; YAN, Ying; QIAO, Lijie; DUAN, Chuanwu; ZHAO, Zhiming. Effect of pulp properties on the power consumption in low consistency refining. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, v. 48, n. 6, p. 869-877, 2020. DOI: 10.5658/WOOD.2020.48.6.869.

MILLER, Timothy J. E. (ed.). *Reactive power control in electric systems*. New York: John Wiley & Sons, 1982.

RUBIANO BERNA, Jorge Enrique; MARTINEZ, Mark; OLSON, James A. Power-gap relationships in low consistency refining. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, v. 34, n. 1, p. 36-45, 2019. DOI: 10.1515/npprj-2018-0039.

RUUSKANEN, Vesa; NIEMELÄ, Markku; PYRHÖNEN, Juha; KANERVA, Sami; KAUKONEN, Juha. Modelling the brushless excitation system for a synchronous machine. *IET Electric Power Applications*, v. 3, n. 3, p. 231-239, 2009. DOI: 10.1049/iet-epa.2008.0079.

WEG. *Motores síncronos: funcionamento, características construtivas, aplicações*. Jaraguá do Sul: WEG, [s. d.]. Disponível em: https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf2/h3b/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.pdf. Acesso em: 13 out. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

WEG. *Synchronous motors: S Line – Horizontal Brushless: installation, operation and maintenance manual*. Jaraguá do Sul: WEG, ago. 2026. Documento n. 11997784, rev. 07.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.