

Desenvolvimento de um Índice de Performance para Análise da Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica na Indústria

Max Augusto Pires ¹, José Vicente Canto dos Santos ², Paulo Ricardo da Silva Pereira ³,
Ronaldo Soares Cardoso Junior ⁴, Érick Storck ⁵

¹ Harman do Brasil, Nova Santa Rita/RS, Brasil (e-mail: maxapires@gmail.com).

² UNISINOS, São Leopoldo/RS, Brasil (e-mail: jvcanto@unisinos.br).

³ UNISINOS, São Leopoldo/RS, Brasil (e-mail: prpereira@unisinos.br).

⁴ HT Micron, São Leopoldo/RS, Brasil (e-mail: ronaldo.junior@htmicon.com.br).

⁵ HT Micron, São Leopoldo/RS, Brasil (e-mail: erick.storck@htmicon.com.br).

Abstract: With the development and implementation of a performance index to analyze the condition of electric power system supply based on the network grid voltage, a study is carried out to analyze the operability of an industrial plant. Based on the concepts of security analysis and formulations to calculate the power flow in electrical power systems, a performance index is proposed for detecting contingencies in the electric power supply network regarding the voltage level delivered by the power supplier company. With the advent of industry 4.0, numerous devices are integrating different operational levels of industries to read the most diverse data, making room for so-called intelligent factories. Through voltage measurements acquired from analyzers installed at strategic points in electrical network of an industry, the performance index is calculated by relating the voltage value measured to the nominal value to get the difference and establish limits for the proper operation of the plant. The results obtained in both tests with simulated data and with real data, demonstrated the success of this initial proposal.

Resumo: Através do desenvolvimento e implementação de um índice de performance para análise da condição de fornecimento de energia elétrica com base na tensão da rede realiza-se um estudo para análise da operacionalidade de uma planta industrial. Com base nos conceitos de análise de segurança e das formulações para cálculo do fluxo de potência em sistemas elétricos de potência, propõe-se um índice de performance para detecção de contingências na rede elétrica de alimentação no que diz respeito ao nível da tensão entregue pela concessionária de energia. Com o advento da indústria 4.0, inúmeros dispositivos estão integrando diferentes níveis de operação nas indústrias para leitura dos mais diversos dados, abrindo espaço para as chamadas fábricas inteligentes. Através de medidas de tensão adquiridas a partir de analisadores instalados em pontos estratégicos de uma rede elétrica industrial, o cálculo do índice de performance é realizado relacionando o valor da tensão medida com o valor nominal para medir a variação e estabelecer limites para a operação adequada da planta. Os resultados obtidos, tanto em testes com dados fictícios como com dados reais, demonstraram o sucesso da proposta inicial.

Keywords: Industry 4.0, Intelligent factory, Security analysis; Performance index; Plant operability.

Palavras-chaves: Indústria 4.0; Fábrica inteligente; Análise de segurança; Índice de performance; Operacionalidade da planta.

1. INTRODUÇÃO

Com o surgimento da chamada Indústria 4.0, tem crescido o número de estudos tratando do tema e abordando problemas anteriormente não levados em consideração. As principais tecnologias habilitadoras dessa revolução incluem a Internet das Coisas (IoT), *Big Data*, computação em nuvem, robótica avançada, inteligência computacional, novos materiais e as novas tecnologias de manufatura aditiva (como impressão 3D) e manufatura híbrida - (CNI, 2016). Nesse contexto, um aspecto importante é o desenvolvimento de fábricas inteligentes, que visam solucionar problemas enfrentados pelo setor industrial e trazer novos benefícios que vão além do aumento da produtividade (Kagermann et al., 2013; Lu,

2017). Nessas plantas industriais, máquinas e insumos “conversam” ao longo das operações com escala e flexibilidade do processo de fabricação, trabalhando de forma relativamente autônoma e integrada (CNI, 2016). Este avanço permite o desenvolvimento de inúmeros equipamentos para a instalação nas fábricas de modo a obter dados preciosos para sua análise de operação. Um exemplo é a implantação de uma fábrica que seja autônoma e que opere continuamente

Considerando o contexto descrito, este trabalho propõe que a conhecida tecnologia de análise de segurança estática em sistemas de energia elétrica, descrita, por exemplo, em Stott et al. (1987) e Silva et al. (2019), seja adaptada para a análise da qualidade de fornecimento de energia elétrica para plantas industriais. Foram formulados índices de desempenho que

refletem condições de operação de plantas, considerando limites operativos das mesmas. Assim consegue-se identificar as situações de contingências, com destaque para aquelas eventualmente críticas, e mensurar a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Um fator importante que permite esta aplicação são as dimensões reduzidas dos sistemas envolvidos e a conseqüente possibilidade de processar os dados oriundos de todos os elementos da rede. Na aplicação convencional as contingências são simuladas, na proposta aqui apresentada as mesmas são identificadas. Esta proposta pode ser realizada em todos os tipos de indústria. Entende-se porém, que o maior interesse existe para plantas de manufatura avançada em que seja buscada operação contínua uniforme. Uma contribuição importante deste trabalho é a agregação de elementos que contemplam também a qualidade de fornecimento de energia elétrica e não apenas a análise de formas de onda, como em vários outros índices propostos na literatura.

Este trabalho prossegue com a apresentação dos conceitos básicos envolvidos, a abordagem proposta, uma descrição de testes e resultados e as principais conclusões obtidas.

2. CONCEITOS BÁSICOS

Os pilares da abordagem aqui proposta são a necessidade de um fornecimento confiável de energia elétrica para alguns tipos de plantas industriais e a tecnologia de análise de segurança estática em sistemas de energia elétrica, ambos descritos nas subseções a seguir.

2.1 Indústria 4.0

O conceito da indústria 4.0 ainda é recente, o termo surgiu em meio a um grupo de trabalho e foi apresentado em um relatório de desenvolvimento da manufatura para o governo alemão. Esta proposta surgiu por meio da necessidade de fortalecimento da competitividade da indústria de manufatura no país (Kagermann et al., 2013). O conceito representa a quarta revolução industrial que sucede a máquina à vapor da primeira revolução industrial, as máquinas elétricas da segunda e a informática e a automação industrial (Sergi, 2015). O avanço da digitalização se mostra presente em diversas áreas como: a mobilidade urbana, com a utilização e desenvolvimento de tecnologias ligadas ao conceito de cidades inteligentes, *smart cities*; eficiência energética, com a implantação de redes elétricas inteligentes, *smart grids*; melhoria no atendimento à saúde em países de dimensões grandes como o Brasil, com o desenvolvimento de soluções como a saúde a distância; e a produtividade industrial e a Manufatura Avançada, com o desenvolvimento da indústria 4.0 propriamente dita (CNI, 2016). A quarta revolução industrial envolve o aumento da informatização na indústria de transformação, com máquinas e equipamentos totalmente integrados em redes de internet. Como resultado, tudo pode ser gerenciado em tempo real, até mesmo a partir de locais diferentes. A inteligência artificial, robótica, análise de dados e a internet das coisas trabalham de forma integrada e sensores permitem a rastreabilidade e o monitoramento remoto de todos os processos (ABDI, 2017).

2.1.1 Fábricas Inteligentes

As fábricas inteligentes são o elemento chave da Indústria 4.0, com a responsabilidade de gerenciar a complexidade dos processos, sendo menos suscetíveis a interrupções, além de possuir manufatura mais eficiente (Kagermann et al., 2013). Nas indústrias inteligentes, máquinas, equipamentos e insumos comunicam-se durante a operação industrial com escala e flexibilidade no processo de fabricação que ocorre de forma relativamente autônoma e integrada. Os dispositivos estão localizados em diferentes pontos da planta ou mesmo em plantas diferentes e trocam informações sobre a operação e os recursos de manufatura. O conceito vai além da integração da produção e distribuição, envolvendo, também, todas as diversas etapas da cadeia de valor partindo do desenvolvimento e projeto, testes, simulação das condições de produção e até mesmo pós-venda (CNI, 2016). A IoT torna possível a criação de redes que abrangem todo o processo de produção e transformam as fábricas em um ambiente inteligente (Kagermann et al., 2013). Em uma fábrica inteligente ideal, as máquinas e equipamentos terão a capacidade de melhorar processos por meio de auto otimização e tomada de decisão autônoma. Isso está em contraste com a execução de operações de programa fixo, como é o caso hoje. Para fazer isso, a futura estrutura das fábricas será muito diferente: uma combinação interconectada de tecnologias de produção inteligentes, com as atuais tecnologias de informação e comunicação de alto desempenho. A desvantagem de aumentar a conectividade e o uso de padrões abertos em redes industriais traz um risco significativamente maior de incidentes de segurança cibernética. O gerenciamento de rede e as ferramentas de segurança podem ser usados para monitorar o comportamento e o tráfego da rede. Eles também podem detectar possíveis ameaças, como padrões de tráfego anormais ou tentativas de acesso não autorizado, e tomar as contramedidas adequadas (Mackenzie, 2015). Nesse contexto, o uso conjunto de diversas tecnologias possibilita a evolução das plantas de produção. Isto torna ainda mais importante que o fornecimento de energia elétrica ocorra de forma adequada e satisfatória, considerando os diferentes requisitos impostos pelos diferentes setores da indústria.

2.2 Análise de segurança em redes elétricas

Na análise de segurança de sistemas elétricos de potência, denomina-se uma contingência a saída de operação prevista ou imprevista de um ou mais equipamentos (linhas de transmissão, transformadores, geradores, banco de reatores / capacitores) (Silva et al. (2019). Estas contingências podem ocorrer por problemas atmosféricos, incêndios, erros humanos, falhas em equipamentos, entre outros (Almeida, 2005). As contingências podem ser classificadas como simples, quando apenas um equipamento sai de operação, ou podem ser classificadas como múltiplas, quando dois ou mais equipamentos saem de operação (Balu, 1992). O objetivo da solução do problema é obter uma lista de contingências possíveis, ordenada pelo impacto que estas causam à operação dos sistemas. A forma convencional de se avaliar o impacto de contingências em sistemas consiste no cálculo de índices de performance, conforme será visto adiante. O problema torna-se complexo quando se considera a necessidade de sua solução em tempo real. O grande número

de tarefas cujo cálculo se faz necessário e a existência de severas restrições de tempo de processamento inviabiliza o método considerado exato, que implica no cálculo do estado da rede na situação pós-contingência para cada caso analisado. Isto porque este processo implicaria em muitas soluções de fluxo de potência para os sistemas que, na realidade, muitas vezes são de grande porte. Esta necessidade tecnológica fez com que surgissem na literatura diversos métodos aproximados para a solução do problema, como por exemplo os propostos por Galiana (1984) e Canto dos Santos et al. (2015).

A possibilidade de monitoramento de plantas em tempo real permite gerenciar e prever situações de interrupções na produção. Distúrbios na rede elétrica vinculada a um sistema produtivo podem provocar falhas no sistema, ou até mesmo a interrupção da produção. Especificamente, níveis de tensão inadequados caracterizam baixa qualidade da energia, além de provocarem maiores perdas no sistema elétrico. Os sistemas elétricos em geral estão sujeitos a uma variedade de problemas de qualidade de energia capazes de interromper processos de produção, afetar máquinas e equipamentos sensíveis, além de causar indisponibilidades e prejuízos. Esta é uma das principais causas de parada em processos industriais ou comerciais (Rocha, 2016).

2.2.1 Índices de performance

Normalmente a classificação da severidade de contingências é realizada com base no cálculo dos chamados índices de performance (ou desempenho) – IP. O IP é um escalar que reflete o montante de violações ou a variação na margem de estabilidade que ocorrerá caso uma contingência venha a ocorrer (Quintela, 2002). Na equação (1) pode-se ver uma formulação genérica de um IP.

$$IP = \sum w_j |f_j(x)|^m \quad (1)$$

Onde:

w_j – é um peso relativo à função $f_j(x)$;

$f_j(x)$ – é a função que relaciona, em geral, uma grandeza elétrica e seu limite de operação;

m – é a ordem do índice de performance.

A equação (2), típica e presente em vários trabalhos, a seguir mostra uma possibilidade de formulação de IP adequado para análise do perfil de tensões de uma rede elétrica de potência.

$$PI_v = \sum_{i \in K} \left(\frac{V_i^{lim} - V_i}{V_i^{lim}} \right)^n \quad (2)$$

Onde:

PI_v – índice de performance para análise de tensão nas barras PQ

K – grupo de barras PQ onde ocorrem violações de limites inferiores ou superiores de segurança para módulo de tensão

V_i^{lim} – limite inferior ou superior de segurança para módulo de tensão na barra i

V_i – módulo da tensão na barra i na situação pós-contingência

n – ordem do índice de desempenho

Conforme será visto adiante, neste trabalho foram formulados índices de performance adequados para a utilização em sistemas elétricos industriais.

3. MÉTODO PROPOSTO

A figura 1 mostra um fluxograma geral do método desenvolvido.

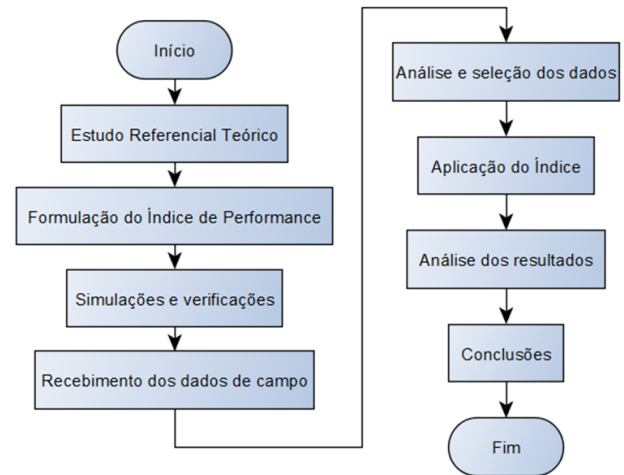


Fig. 1 Visão geral do método desenvolvido

A formulação do índice de performance se baseia na relação da tensão medida e o seu limite máximo até ser considerada precária, segundo o PRODIST (2018). O objetivo é relacionar a tensão com os valores máximos e mínimos que são classificados como zona precária de atendimento. Primeiramente realizou-se uma análise considerando avaliar o valor atual de medição com o valor máximo até que a classificação do fornecimento seja alterada de adequada para precária.

Esta abordagem do problema considera como limite, o valor correspondente a máxima variação de tensão a partir da tensão nominal ao limite máximo ou mínimo conforme a norma. Desta forma é prudente separar as variáveis para trabalhar com a relação.

$$V_{Superior} = VL_{Máximo} - V_{Nominal} \quad (3)$$

$$V_{Inferior} = V_{Nominal} - VL_{Mínimo} \quad (4)$$

Assim quantifica-se a tensão de desvio máxima permitida para que o fornecimento passe da classificação adequada para precária. O objetivo deste modelo é trabalhar a relação entre a variação máxima permitida e a variação atual do sistema. A figura 2 apresenta graficamente a proposta da relação.

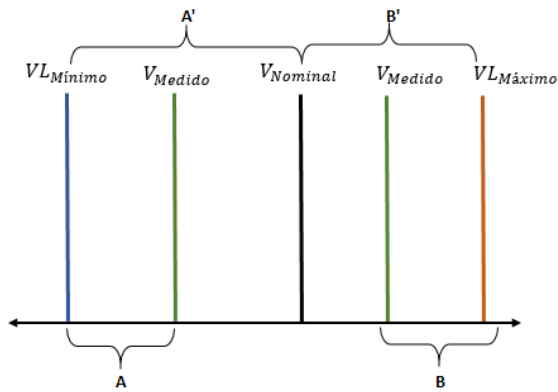


Fig 2. Representação da relação conforme variação.

Partindo desta apresentação gráfica, uma relação inicial como apresentado em (5) pode servir como base para uma formulação mais completa considerando todas as variáveis.

$$IP = \frac{A' - A}{A'} \text{ ou } \frac{B' - B}{B'} \quad (5)$$

Com base nesta razão entre os valores limites, temos que A' equivale a $V_{Inferior}$ de (4) e B' equivale a $V_{Superior}$ de (3). A e B referem-se ao módulo da diferença entre o valor medido e o seu limite correspondente. Uma formulação que atende essa proposta pode ser implementada conforme abaixo.

$$IP = \begin{cases} \frac{V_{Inferior} - (V_{Medido} - VL_{Mínimo})}{V_{Inferior}}, & V_{Medido} < V_{Nominal} \\ \frac{V_{Superior} - (VL_{Máximo} - V_{Medido})}{V_{Superior}}, & V_{Medido} > V_{Nominal} \\ 0, & V_{Medido} = V_{Nominal} \end{cases} \quad (6)$$

Esta formulação considera situar a localização do valor medido entre a variação máxima permitida conforme a classificação adequada de fornecimento de energia. A formulação ainda pode ser melhorada considerando o nominador apenas pela diferença do valor medido pelo valor nominal, como apresentado em (7).

$$IP = \begin{cases} \frac{V_{Nominal} - V_{Medido}}{V_{Inferior}}, & V_{Medido} < V_{Nominal} \\ \frac{V_{Medido} - V_{Nominal}}{V_{Superior}}, & V_{Medido} > V_{Nominal} \\ 0, & V_{Medido} = V_{Nominal} \end{cases} \quad (7)$$

Considerando a variação de tensão simétrica, isto é, equivalente tanto para o limite máximo inferior quanto superior esta formulação poderia ser escrita de maneira genérica. Desta forma a variação para mais ou para menos da tensão é a mesma.

$$IP = \frac{|V_{Nominal} - V_{Medido}|}{V_{VariaçãoMáxima}} \quad (8)$$

Ao utilizar o módulo da variação da tensão em relação ao valor nominal, obtêm-se o mesmo resultado que alterar a ordem de subtração dos elementos conforme a localização da tensão medida abaixo ou acima do valor nominal. Esta é a

forma mais reduzida para representar a formulação do índice de performance em caso de simetria dos limites.

Em contrapartida, busca-se por uma formulação para eliminar o fator condicional referente a seleção da equação adequada para atender o limite acima ou abaixo do valor nominal, para organizar uma soma de forma que as contribuições negativas se cancelem. A equação (7) retorna um valor de IP negativo se aplicar a primeira função para um valor de tensão maior que o nominal, por exemplo. O cancelamento ocorre ao adicionar o módulo desta contribuição na soma. A base para esta formulação pode ser vista nas equações de transgressão de tensão inferior e superior apresentada em (Pereira, 2009), que representam o nível de violação dos limites de tensão nos patamares de carga.

$$IP = IP_I + IP_S \quad (9)$$

$$IP_I = \frac{\left(\frac{|V_{Nom} - V_{Med}|}{V_{Inf}} + \frac{V_{Nom} - V_{Med}}{V_{Inf}} \right)}{2} \quad (10)$$

$$IP_S = \frac{\left(\frac{|V_{Med} - V_{Nom}|}{V_{Sup}} + \frac{V_{Med} - V_{Nom}}{V_{Sup}} \right)}{2} \quad (11)$$

3.1 Proposta para classificação qualitativa do IP

O valor do índice calculado representa a situação da tensão em relação a máxima variação que pode ocorrer dentro dos limites conforme as normas vigentes. Pode-se dar um significado a este valor criando uma faixa de forma a representar uma situação de operação específica. Considerando os limites de tensão presentes no PRODIST, o valor do índice abaixo da unidade representa o fornecimento de tensão dentro da faixa adequada para determinado valor nominal. Após há outra faixa, correspondente ao intervalo de tensão precária e por fim um valor limite para fronteira com a faixa crítica. A tabela 1 traz uma classificação, considerando os limites para tensão nominal de 208V.

Tabela 1 Exemplo de classificação qualitativa

Valor do IP	Condição
IP < 1	Adequada
1 < IP < 1,2	Precário
IP > 1,2	Crítico

Contudo estes valores fixos são verdadeiros apenas em situações em que o limite máximo de variação da tensão dentro da faixa nominal é simétrico. Também se trabalha com diferentes valores nominais, gerando novos valores limites. Para entender melhor o cenário, realizou-se a relação dos valores para verificação dos limites de transgressão do nível precário para o nível crítico, conforme a tabela 2.

Tabela 2 Classificação do IP pelo valor nominal.

Tensão Nominal	Nível limite inferior	Nível limite superior
120V	1,6000	1,1667
208V	1,5882	1,2000
220V	1,6111	1,1818
380V	1,6333	1,2105

A tabela 2 apresenta os níveis máximos calculados a partir da equação 8 sobre os limites das tensões nominais de 208/120V e 380/220V, os valores correspondem ao valor do IP que indicaria uma transgressão de tensão da faixa precária para a faixa crítica. Note que há diferenças entre os limites inferiores e os limites superiores, isso porque as tolerâncias não são simétricas, sendo os limites inferiores maiores que os limites superiores. A alternativa mais segura é trabalhar com o valor mais baixo e que represente o primeiro risco no sistema. A seguir, novos níveis podem ser estabelecidos para analisar diferentes pontos de operação. Os critérios utilizados para a criação desses novos níveis devem estar embasados no conhecimento do sistema, de forma que o valor reflita os níveis de risco existente para máquinas e equipamentos.

3.2 Proposta de um índice global de plantas industriais

Realizando o somatório do IP de diversos pontos da planta pode-se chegar a um valor correspondente à condição de atendimento no fornecimento de energia elétrica dentro dos padrões estabelecidos. Assim, tem-se um índice que representa a totalidade de uma planta e indica a condição de fornecimento de tensão dentro dos limites adequados.

$$IP_G = \sum_{i=1}^{nm} \sum_{k=1}^{nd} IP_{i,k} \quad (12)$$

Onde:

IP_G – índice de performance global;

IP – índice de performance de cada grandeza lida;

nm – quantidade de medidores;

nd – quantidade de IP calculado por medidor;

4. TESTES E RESULTADOS

A planta industrial utilizada para testar a proposta apresentada neste trabalho tem alimentação primária através de 4 transformadores, que distribuem duas faixas de tensão para o circuito interno. Não será apresentado o circuito elétrico de forma integral devido ao sigilo de informação privada e comercial.

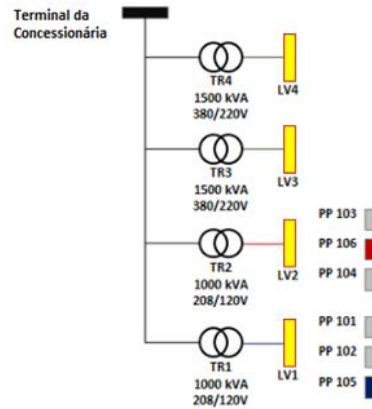


Fig. 3 Sistema elétrico da planta industrial

A figura 3 apresenta uma representação do quadro de ligação da concessionária aos transformadores e parte da divisão interna dos circuitos de energia elétrica da planta. Os analisadores de rede foram instalados em diversos pontos do circuito a fim de avaliar as condições do fornecimento de energia por parte da fornecedora e a verificação da ocorrência de distúrbios tanto na rede externa quanto na rede interna de energia. A avaliação realizada neste trabalho baseou-se em dados de medidores instalados no transformador TR4 (LIV4) e de medidores instalados na entrada de um único equipamento da fábrica que possui três entradas de energia. Neste, foram instalados registradores em cada entrada de energia que foram descritos como módulo da direita – ATE_DIR, módulo da esquerda – ATE_ESQ e Handler. Não se teve acesso a maiores detalhes dos equipamentos ligados a rede de LIV4, mas se tratando de máquinas de um sistema de manufatura avançada para fabricação de componentes semicondutores e memórias, tem-se uma noção quanto a sua capacidade e minúcia, bem como sua sensibilidade e necessidade de trabalho em ambiente extremamente limpo e controlado. Destaca-se que uma comparação direta com outros índices propostos na literatura não é possível uma vez que estes não estão disponíveis para o sistema elétrico utilizado para testar o índice aqui apresentado.

Tabela 3 Limites de Tensão em Regime Permanente – $V_{NOMINAL}$ 208/120V e 380/220V.

Tensão Nominal	120V	208V	220V	380V
Faixa Crítica Inferior (V)	TL<104	TL<181	TL<191	TL<331
Faixa Precária Inferior (V)	104≤TL≤110	181≤TL≤191	191≤TL≤202	331≤TL≤350
Faixa Adequada (V)	110≤TL≤126	191≤TL≤218	202≤TL≤231	350≤TL≤399
Faixa Precária Superior (V)	126≤TL≤127	218≤TL≤220	231≤TL≤233	399≤TL≤403
Faixa Crítica Superior (V)	TL>127	TL>220	TL>233	TL>403

Fonte: Adaptado de PRODIST – Módulo 8. ANEEL. 2018.

Consultando o PRODIST – Módulo 8, pode-se extrair os limites das faixas de tensão de fornecimento do secundário dos transformadores, conforme apresentados na tabela 3, para observar os limites dos pares de tensão em regime permanente 380/220V e 208/120V, onde TL representa a tensão de leitura para verificação.

Após a seleção dos dados recebidos, foi calculado o índice de performance para a análise do módulo de tensão da rede em diferentes pontos da planta, graças ao posicionamento de sensores em locais estratégicos da rede da indústria. Escolheu-se a formulação proposta em (9) por simplicidade e adequação.

4.1 Transgressões de faixa de tensão detectadas.

O equipamento em análise, ligado a rede elétrica interna da planta, possui três entradas de energia trifásicas 208/120V, sendo duas entradas alimentadas apenas com as tensões de linha. A análise do IP foi realizada através do cálculo sobre os registros e plotando um gráfico de saída para verificação sistêmica das medidas de ATE_DIR. A figura 4 a seguir apresenta graficamente o resultado dos cálculos realizados, contendo dados medidos no dia 1º de junho de 2019, dia em que houve o registro da transgressão da faixa adequada para precária.

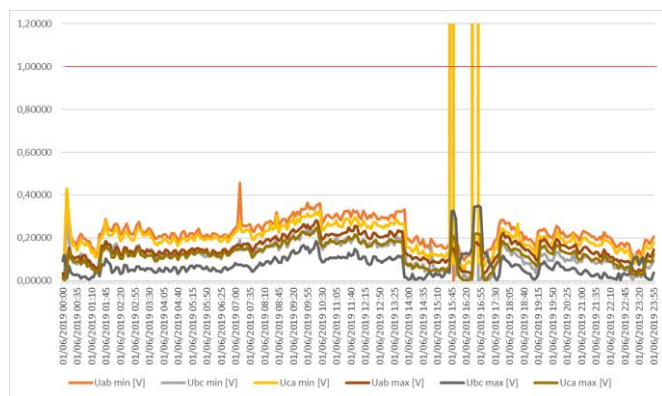


Fig. 4 Gráfico do IP de ATE_DIR – Tensões de Linha.

Como pode-se verificar, houve registros acima do nível unitário do índice indicando que naquele período, o valor da tensão transgrediu a faixa adequada de tensão. Mais detalhes são apresentados na tabela 4, onde estão listados os cinco registros com o maior valor do índice calculado.

Tabela 4 Maiores IP de em ATE_DIR.

Registro	IP	N	Uab min [V]
01/06/2019 15:45	12,2329	1,0000	0,04
01/06/2019 16:40	12,2329	1,0000	0,04
01/06/2019 16:45	12,2324	1,0000	0,05
01/06/2019 07:10	0,4576	0,0374	200,22
03/06/2019 08:25	0,4271	0,0349	200,74

Através dos dados apresentados da tabela 4, percebe-se que as mínimas tensões de linha lidas no intervalo do registro chegaram a praticamente zero Volts em alguns registros, o que leva a suspeitar de algum tipo de desconexão do circuito nesses dois períodos específicos. Entretanto, avaliando os registros das máximas das tensões de linha no mesmo período, percebe-se que houve registros dentro da faixa adequada. O mesmo se tem ao avaliar os dados para a tensão média analisada os dados puros recebidos. Desta forma, conclui-se que realmente ocorreram variações de tensão de curta duração no período.

Aplicou-se a mesma abordagem na avaliação dos resultados do cálculo do IP para os dados da entrada esquerda de energia do equipamento, plotando o gráfico com os dados do dia 1º de junho de 2019 apresentado na figura 5. Verifica-se novamente que houve variação significativa no valor da tensão de linha do equipamento, uma vez que o valor do índice ultrapassa o nível máximo do gráfico (1,2). Nos dados apresentados na tabela 5 percebe-se que o valor do índice e a data dos registros são idênticos ao valor do IP e as datas vistos anteriormente, indicando que este circuito também foi afetado pelo distúrbio na rede elétrica. Analisando os valores do IP, percebe-se três registros com valores altos, representando um valor de tensão baixo. Comparando com os principais dados referentes a entrada de energia da direita, ATE_DIR, se observa que houve um distúrbio naquela rede de energia, pois dois circuitos analisados capturaram as mesmas variações.

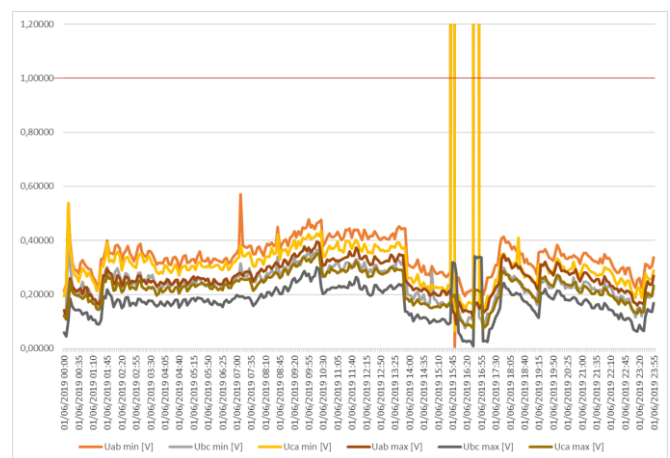


Fig. 5 Gráfico do IP de ATE_ESQ – Tensões de Linha.

Tabela 5 Maiores IP da Tensão de Linha dos registros de ATE_ESQ.

Registro	IP	N	Uab min [V]
01/06/2019 15:45	12,2335	1,0000	0,03
01/06/2019 16:40	12,2335	1,0000	0,03
01/06/2019 16:45	12,2329	1,0000	0,04
01/06/2019 07:10	0,5700	0,0466	198,31
03/06/2019 08:25	0,5482	0,0448	198,68

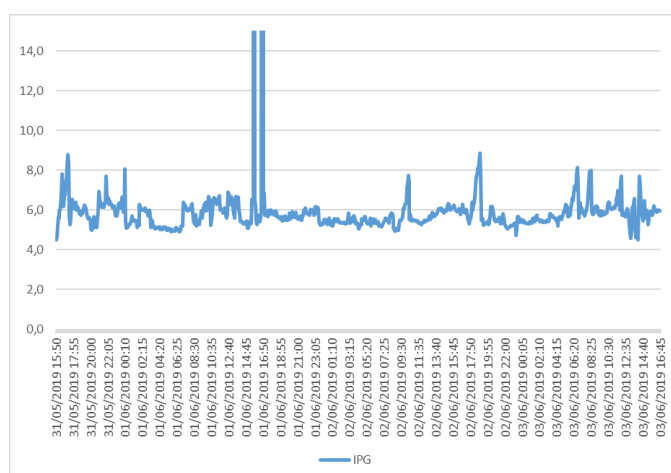
4.2 Análise e índice global

A compilação dos resultados obtidos mostra que o índice foi eficaz, pois houve situações em que a tensão saiu da operação adequada e o valor do IP resultante foi maior que 1,0. Os resultados mostram que o nível de tensão nos quatro pontos analisados se manteve praticamente dentro da faixa adequada nos dois circuitos analisados, pois o valor do IP ficou abaixo do limite adequado. Apenas alguns desequilíbrios de tensão foram capturados pelos analisadores portáteis no período analisado.

Os IPs de ATE_DIR e ATE_ESQ, mostram que houve períodos em que a tensão saiu fora dos limites adequados, chegando a 0V. Ambas medidas foram registradas nos mesmos intervalos, indicando que ocorreu um distúrbio na rede elétrica de alimentação do equipamento entre as 15:40 h e as 16:45 h do dia 01 de junho. Neste período, os valores de IP indicam que houve contingências na tensão de alimentação do equipamento, que podem ou não ter resultado na saída de operação da máquina elétrica.

Seguindo a mesma metodologia, organizou-se os dados para realizar uma análise considerando os quatro conjuntos de dados obtidos. Reuniu-se todos para analisar graficamente o índice de performance global IPG, conforme a figura 6. Assim pode-se avaliar as condições de fornecimento de energia elétrica, no que diz respeito a tensão. Uma análise mais detalhada poderia ser realizada cruzando esses dados com informações sobre a operacionalidade do equipamento, para entender se as variações de tensão de curta duração detectadas foram suficientes para retirá-lo de operação. O valor máximo atingido foi cortado para melhor visualização do gráfico, assim pode-se observar períodos com maior oscilação e períodos mais estáveis no valor do índice. Períodos com maiores valores do índice e os picos, indicam que naqueles momentos os IP de tensão foram maiores indicando que a tensão de alimentação da rede sofreu pequena variação levando ao afastamento da tensão nominal.

Fig. 6 Gráfico do IPG.



Já os períodos em que o IPG se manteve com valor baixo e com pouca oscilação, indicam melhor operação dentro da

faixa adequada e maior estabilidade da tensão dos circuitos da rede da planta. Aplicando esse conceito nos dados obtidos e normalizando os resultados obteve-se o seguinte resultado apresentado a seguir na tabela 6, correspondente aos 5 maiores valores ordenados em forma decrescente.

Tabela 6 Principais resultados do IP global.

Registro	IPG	IPG_N
01/06/2019 16:45	79,6998	1,0000
01/06/2019 16:40	79,5308	0,9979
01/06/2019 15:45	79,4266	0,9966
02/06/2019 19:00	8,8649	0,1112
31/05/2019 17:15	8,7783	0,1101

Percebe-se que os três maiores valores correspondem exatamente ao período em que houve interrupções de curta duração nos circuitos de ATE_DIR e ATE_ESQ identificados anteriormente. Normalizar os resultados pelo maior valor obtido possibilita a verificação das principais ocorrências em que o índice global – IPG_N foi mais alto. Verifica-se pelos valores da coluna N na tabela 6, além do período em que houve a contingência, os demais equivalem a em média 10% da gravidade do pior caso registrado. Com estes dados pode-se afirmar que, além da ocorrência na tarde do dia 01 de junho, a planta operou dentro da faixa adequada em praticamente todo período, indicando um desempenho adequado de qualidade quanto a tensão da rede.

É necessário ainda, neste método de análise através do somatório dos índices, estabelecer os níveis para identificar a ocorrência de contingências na planta. Um nível poderia ser construído levando em consideração cada IP calculado, sendo o valor desse nível equivalente a multiplicação do valor unitário do IP pela quantidade de IPs calculados. Neste cenário, uma violação do nível ocorreria quando todos os IPs violassem a faixa adequada. Tendo acesso a demais registros de ocorrências da planta fabril no que tange as máquinas e equipamentos de produção, uma análise mais completa poderia ser realizada, uma vez que determinados episódios de saída de operação podem ter relação com a qualidade de energia elétrica de alimentação. Outros distúrbios podem causar problemas em máquinas e equipamentos, desta forma o índice pode ser utilizado para analisar essas ocorrências e verificar sua relação com a tensão de alimentação, a procura de padrões que, em determinadas situações, podem até mesmo manifestar-se dentro dos níveis adequados de tensão

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que o método proposto atingiu os objetivos desejados. A formulação do IP apresentada para identificar os registros de tensão fora da faixa adequada de fornecimento segundo o PRODIST – Módulo 8 (ANEEL, 2018), teve desempenho adequado nos testes preliminares realizados através da simulação de dados. Este resultado positivo foi crucial para então ser aplicado e analisado considerando dados de campo de uma planta industrial. A partir da análise com os dados de

um sistema real, pode-se comprovar a utilidade e validar o IP desenvolvido, pois foi possível identificar os períodos em que ocorreram distúrbios na rede elétrica. Assim, pode-se utilizar os resultados para analisar a condição da planta considerando os valores de todos os índices calculados para os diferentes dados de cada um dos quatro medidores instalados no período analisado.

Ainda que com apenas quatro pontos de medida na planta, uma análise breve através do somatório dos índices calculados foi realizada e apresentou resultados satisfatórios, uma vez que o índice global (IPG) refletiu em seu valor, períodos em que realmente ocorreram distúrbios críticos na rede elétrica da planta. Desta forma, validou-se também o índice global para análise da planta de modo geral, abrindo possibilidade inclusive para adição de índices sobre outras grandezas elétricas, o que resultaria num índice mais completo para avaliar a condição da planta quanto ao recurso de energia elétrica.

Enfim, conclui-se que o método proposto satisfaz a proposta inicial e a formulação do índice utilizada é eficaz na identificação de contingências nas medidas de tensão, podendo inclusive ser utilizado em conjunto com outros pontos de medida para gerar um índice global capaz de refletir a operacionalidade da planta dentro dos limites adequados de tensão. Considera-se que a formulação do índice proposto neste trabalho, poderá contribuir para o desenvolvimento das fábricas inteligentes no Brasil, pois o mesmo, devidamente aplicado, permite a identificação de contingências na rede elétrica da planta industrial, podendo inclusive estimar a condição de operação da planta.

Como sugestão de continuidade, índices relacionados, por exemplo, com a quantidade de leituras, são variantes do cálculo que podem ser utilizados com custo computacional relativamente baixo, para prever distúrbios e ocorrências na rede elétrica de circuitos internos. O acesso a mais dados do sistema com outros pontos de coleta de dados, permitiria analisar a planta industrial de forma completa. No âmbito da Indústria 4.0 pode-se utilizar de dispositivos IoT para coleta de dados singulares, mas determinantes no processo em análise. A utilização do IP formulado não se limita apenas a análise de tensão e o mesmo poderia ser utilizado para classificar e identificar contingências no sistema produtivo, com base em medidas determinantes quanto à operacionalidade da planta. Outros índices a partir dos dados registrados podem ser formulados, bem como outras classificações para o índice podem ser elaboradas aumentando o nível de informação concentrada no valor do índice de performance.

REFERÊNCIAS

- ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. 2017. Disponível em: < <https://www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-a-o-ano-para-o-brasil>>. Acesso em: 02 mai. 2019.
- ALMEIDA, S. e Pestana, R. (2005). Definição e análise de contingências severas na Rede Elétrica Portuguesa, 9º

- Congresso Hispano-Luso de Engenharia Electrotécnica, 1-9.
- BALU, N., et al. (1992), On-Line Power System Security Analysis. Proceedings of IEEE, Vol.80, 262-280.
- CANTO DOS SANTOS, J. V. Costa, I., Nogueira, T. New genetic algorithms for contingencies selection in the static security analysis of electric power systems, Expert Systems with Applications, Volume 42, Issue 6, 2015, Pages 2849-2856
- CNI, Conselho Nacional da Indústria - Brasil. desafios para indústria 4.0 no Brasil. (2016). Disponível em: <<http://pedbrasil.org.br/wp-content/uploads/2018/12/19.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2019.
- GALIANA, F. (1984) Bound estimates of the severity of line outages in power system contingency analysis and ranking, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS103, No. 9, 2612-2624.
- INTELLIGENT FACTORY. (2019). Otimização do Custo Operacional de Fábricas para Microeletrônica via Internet das Coisas (IoT). Instituto Tecnológico em Semicondutores - IttChip. São Leopoldo: UNISINOS.
- KAGERMANN, H., W. et al. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Disponível em: <https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf>. Acesso em: 11 mai. 2019.
- MACKENZIE, H. (2005). The Smart Factory of the Future – Part 1. Disponível em: <<http://www.belden.com/blog/industrialethernet/The-Smart-Factory-of-theFuture-Part-1>>. Acesso em: 15 mai. 2019.
- PEREIRA, Paulo R. da S. (2009). Métodos para Otimização dos Ajustes dos Reguladores de Tensão e Zonas de TAP em Sistemas de Distribuição. Dissertação de mestrado. Santa Maria: UFSM.
- PEREIRA, Paulo R. da S. (2018). Relatório Parcial #1 Análise da Qualidade da Energia. IttChip - Intelligent Factory. São Leopoldo: UNISINOS.
- PRODIST. (2018). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10. ANNEL.
- QUINTELA, Adriana Ferreira. (2002). Estudo de índices de proximidade ao limite da estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências. Campinas: UNICAMP.
- ROCHA, Joaquim Eloir. Qualidade da Energia Elétrica. Departamento de eletrotécnica. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.
- SERGI, B. S. (2015). Strategic Fator Analysis for Industry 4.0. Journal of Security and Sustainability Issues. 8(2), 159-169.
- SILVA, Juarez Machado da; Santos, José Vicente Canto dos; Costa, I.; Barbosa, Jorge Luis Victória; Braun, T ; Pessin, G. (2019). Towards a More Reliable System for Contingency Selection in Static Security Analysis of Electric Power Systems. IEEE Systems Journal, p. 1-12.
- STOTT, O. Alsac and A. J. Monticelli. (1987) "Security analysis and optimization," in Proceedings of the IEEE, vol. 75, no. 12, pp. 1623-1644, doi: 10.1109/PROC.1987.13931.