

IMPLEMENTAÇÃO DE SET POINT DINÂMICO NO COMUTADOR DE TAP DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Matheus Jerry Vieira Rezende¹, Rafael de Paula Cosmo²

¹ Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica

² Doutor em Engenharia Mecânica – Docente Multivix – Vitória

RESUMO

Este estudo de caso adota uma abordagem qualitativa e explicativa para compreender as relações de causa e efeito relacionadas a um problema específico em uma usina de uma indústria de mineração. O problema em questão está relacionado à variação de tensão no sistema elétrico, que pode resultar em falhas e danos a equipamentos sensíveis. A usina é alimentada por uma subestação elétrica que recebe energia da concessionária a 138kV e a rebaixa para 13,8kV usando um transformador de potência com comutador de tap sob carga. A pesquisa se concentra na estabilização da média tensão, uma vez que isso afeta indiretamente a baixa tensão. Devido à queda de tensão causada pela grande demanda de energia e pela distância entre os sistemas de 13,8kV e 4,16kV. No entanto, o valor de referência é estático e não considera as variações na demanda de energia. Para abordar esse problema, foi explorada a possibilidade de manter a tensão de saída em 13,8kV, independentemente da queda de tensão, usando o TAPCON Dynamic Set Point Control. Esse sistema que ajusta o valor de referência do comutador de tap de acordo com as variações na potência, evitando sobretensão ou subtensão nos equipamentos. Esse estudo de caso demonstra como a utilização do TAPCON Dynamic Set Point Control pode manter a estabilidade da tensão em sistemas elétricos, reduzindo o desgaste de equipamentos e garantindo um fornecimento de energia confiável.

1 INTRODUÇÃO

Os problemas de qualidade de energia relacionados às variações de tensão na rede elétrica exigem a utilização de reguladores de tensão para manter os níveis dentro dos limites estabelecidos pela resolução 505/2001 da ANEEL. A resolução da ANEEL estabelece critérios e diretrizes para a qualidade de energia em sistemas de distribuição, determinando os limites de variação de tensão a serem seguidos pelas concessionárias de energia elétrica (ANEEL, 2011).

Os sistemas de regulação de tensão, são muito utilizados em na distribuição de energia elétrica, com a utilização de comutadores eletromecânicos, que asseguram um desempenho eficiente na tarefa de controle de tensão, desempenhando um papel crucial na estabilização da tensão fornecida aos consumidores, garantindo uma alimentação elétrica estável e confiável, protegendo os equipamentos e assegurando o funcionamento adequado dos sistemas elétricos (LESZCZYNSKI, 1998).

A falta de regulação adequada da tensão elétrica pode acarretar uma série de problemas significativos para os usuários finais. A ocorrência de sobretensões ou subtensões prolongadas pode resultar em operação inapropriada, ou menos eficiente dos equipamentos elétricos, desarmes inesperados de cargas sensíveis e superaquecimento de motores de indução. Esses efeitos indesejados podem levar a interrupções no fornecimento de energia, danos aos componentes elétricos, redução da vida útil dos equipamentos e aumento dos custos de manutenção (SHORT, 2006).

A principal causa dos problemas de regulação de tensão é a presença de uma alta impedância no sistema elétrico para atender adequadamente à carga. Isso indica que o sistema elétrico é insuficiente para suportar a carga, resultando em uma queda significativa de tensão durante cargas pesadas. Por outro lado, quando a tensão da fonte é elevada e uma carga mais baixa, pode ocorrer uma condição de sobretensão quando a carga é reduzida (DUNGAN et al., 2002).

Embora os eventos de queda de tensão, estão geralmente relacionados a falhas no sistema elétrico, também possam ser causados pela elevada corrente de partida de motores de indução. Esses eventos podem resultar em uma perda significativa no fornecimento de energia elétrica, com impactos que variam em diferentes setores, no caso do estudo, o setor industrial. Além disso, as quedas de tensão podem levar ao desligamento de sistemas eletrônicos, mau funcionamento de

equipamentos e disparos indesejados, entre outros efeitos indesejados (LLERENA, 2006).

Em um determinado cenário, foi identificada uma queda de tensão significativa durante a operação máxima de uma usina. Para compensar essa queda de tensão e garantir um sistema com tensão mais estável, foi necessário ajustar o comutador de tap do transformador que alimenta essas cargas para 14,1 kV. No entanto, houve a elevação de tensão quando havia baixa carga na usina, podendo diminuir a vida útil dos equipamentos ou até causar danos em equipamentos mais sensíveis.

Diante dessa situação, percebeu-se a necessidade de ajustar manualmente o valor de referência (set point) do comutador para 13,8 kV quando a usina era desligada ou estava com baixa carga. Essa medida era necessária para manter uma tensão ideal para as pequenas cargas em operação, como pequenos motores, iluminação e salas administrativas. Essa solução temporária demonstrou a oportunidade de realizar um estudo de caso com o objetivo de resolver o problema utilizando os recursos já instalados nas subestações e tornar o fornecimento de energia para a usina mais estável e confiável.

Portanto, o estudo proposto neste trabalho fica restrito a análise de tensão nos pontos de média tensão de uma determinada usina de uma indústria de mineração, se limitando ao estudo e implementação do set point dinâmico e do TAPCON no módulo comutador de tap responsável por alimentar uma usina.

Pensando no problema citado, foi observada a oportunidade de realizar a automatização do set point do secundário do transformador de diversas formas, o comutador instalado é moderno e contém um módulo controlador com diversas aplicações para deixar mais autônomo e confiável o equipamento. Após o estudo do módulo e do sistema elétrico, será definida a melhor aplicação a ser utilizada para controle do valor de referência.

Com o objetivo de avaliar a mitigação das altas variações de tensão que alimenta as cargas da usina, de uma indústria de mineração e evitar problemas nos ativos devido as sub e sobretensões. A partir de coletas e avaliações dos dados de tensão e de potência, cálculo do range das potências e tensões ideais para o sistema, aplicação dos valores de tensão e potência no módulo de controle do comutador de tap e validação do método e os valores aplicados no sistema TAPCON (Tap Controller), utilizando uma mala de testes de medidores e relés injetando corrente e tensão, simulando a situação real na usina.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA TRIFÁSICO

O transformador de potência trifásico é um dispositivo essencial no setor elétrico, responsável por transferir energia elétrica entre diferentes níveis de tensão, geralmente em sistemas de distribuição e transmissão de energia em larga escala. Ele opera com base nos princípios do eletromagnetismo, é composto por um núcleo magnético de material ferromagnético e por dois enrolamentos, primário e secundário, em alguns casos podendo ter um terceiro enrolamento para alguma aplicação específica. O enrolamento primário está conectado à fonte de alimentação de alta tensão, enquanto o enrolamento secundário está conectado à carga ou ao sistema de distribuição, na figura abaixo, temos exemplos de transformadores de pequeno, médio e grande porte (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 1 – Exemplo de transformadores de potência



O princípio de funcionamento do transformador é baseado na indução eletromagnética. Quando uma corrente alternada passa pelo enrolamento primário, ela gera um campo magnético alternado no núcleo do transformador. Esse campo magnético induz correntes alternadas nos enrolamentos secundários, que estão acoplados magneticamente ao enrolamento primário. Assim, a energia é transferida do enrolamento primário para o secundário, com a relação de transformação definida pelo número de espiras em cada enrolamento. A relação de transformação é determinada pela razão entre o número de espiras do enrolamento primário e o

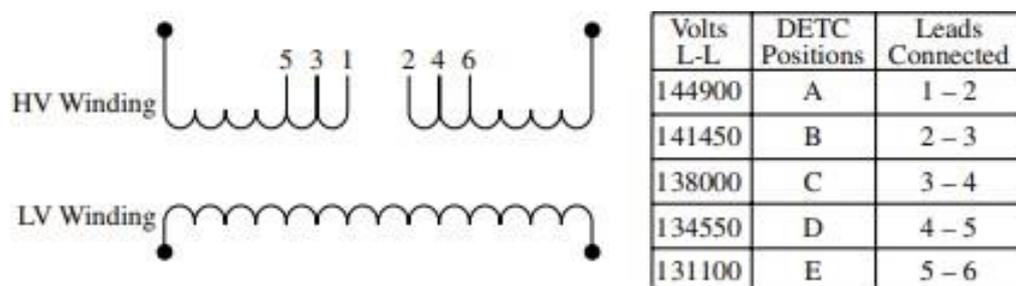
número de espiras do enrolamento secundário. Essa relação determina a magnitude da tensão elétrica transformada pelo transformador (KULKARNI; KHAPARDE, 2013).

2.2 COMUTADOR DE TAP OLTC

A capacidade de ajustar a relação de espiras de um transformador, por meio do tap, é uma característica desejável para compensar as variações na tensão que ocorrem devido à regulação do transformador e aos ciclos de carga. O tap é um ponto de conexão que permite modificar o número de espiras efetivas nos enrolamentos do transformador, a modificação do número de voltas no circuito do equipamento é frequentemente realizado retirando uma parte do enrolamento do circuito, sendo que em muitos transformadores, essa operação é executada por meio de um dos enrolamentos principais, no qual uma seção ou seções são retiradas (HARLOW, 2004).

Ao alterar o número de espiras, é possível modificar a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída do transformador, permitindo assim o ajuste da tensão de saída conforme as necessidades do sistema elétrico, a figura abaixo ilustra o esquema de conexões das derivações do tap retirando seções do enrolamento. (HARLOW, 2004).

Figura 2 - High-voltage winding schematic and connection diagram for 138-kV example



Fonte: HARLOW, James, 2004, p. 39.

Então a capacidade de ajuste do tap é particularmente importante em situações em que as condições de carga variam ao longo do tempo, garantindo assim uma regulação adequada da tensão e um fornecimento de energia estável. Existem diferentes métodos e dispositivos utilizados para realizar o ajuste do tap, como os comutadores de tap, que permitem a seleção de diferentes pontos de conexão para

ajustar a relação de transformação. Esses dispositivos proporcionam flexibilidade e precisão no ajuste da relação de espiras, permitindo uma operação eficiente e confiável do transformador de potência (HARLOW, 2004).

Os transformadores com comutadores de tap sob carga (OLTC - On-Load Tap Changer) são amplamente utilizados em subestações de distribuição de alta potência e nas indústrias. Eles desempenham um papel crucial na regulação da tensão da barra da subestação, que deve ser ajustada de acordo com a demanda de carga em constante variação. Esses transformadores garantem uma entrega de energia elétrica estável e confiável, permitindo uma adaptação precisa às flutuações de carga ao longo do tempo (MAMEDE FILHO, 2013).

A comutação automática de tap em transformadores é realizada por meio de motores controlados por um sistema de controle que monitora constantemente o nível de tensão de saída do transformador. O controlador utiliza um valor de referência para a tensão de saída e a compara com a tensão de referência da barra. Quando a tensão ultrapassa a faixa de tolerância estabelecida, após um atraso programado, o controlador realiza a comutação de tap para corrigir a tensão (SHORT, 2006).

Dessa maneira, a operação é essencial para manter a estabilidade e qualidade do fornecimento de energia. Além disso, o controlador do transformador OLTC pode utilizar a compensação de queda de tensão na linha (LDC) para manter a tensão constante em um ponto específico do sistema elétrico. O LDC calcula a queda de tensão na rede com base nos parâmetros de impedância da linha e nas medições de corrente e tensão realizadas no próprio transformador OLTC. Dessa forma, o controlador é capaz de estimar os ajustes necessários para manter a tensão regulada na barra de referência de medição (SHORT, 2006).

2.3 VARIAÇÃO DA TENSÃO

A tensão, também conhecida como diferença de potencial elétrico, é uma grandeza fundamental na área da eletricidade. Ela representa a força que impulsiona a corrente elétrica por meio de um condutor. A tensão é medida em volts (V) e indica o nível de energia elétrica disponível para o movimento dos elétrons. A tensão pode ser classificada em diferentes níveis, dependendo da aplicação. Tensões baixas, como as encontradas em aparelhos eletrônicos e residências, geralmente variam de 110 V a 220 V. Já tensões médias, usadas em sistemas industriais e comerciais,

podem variar de 2,3 kV a 36 kV. Por fim, tensões altas, encontradas em sistemas de transmissão de energia elétrica, podem chegar a centenas de quilovolts (kV) ou megavolts (MV) (GUSSOW, 2009).

Sobretensões são aumentos eficazes na tensão CA acima de 1,1 pu, com valores típicos entre 1,1 pu e 1,2 pu, por uma duração superior a 1 minuto. Elas podem ocorrer devido à comutação de carga, variações na compensação reativa do sistema, capacidades ou controles deficientes de regulação de tensão e configurações de tap incorretas nos transformadores. Por outro lado, subtensões são diminuições na tensão abaixo de 0,9 pu, com valores típicos entre 0,8 pu e 0,9 pu, por uma duração superior a 1 minuto. Elas são causadas por eventos opostos aos que causam as sobretensões, como a ativação de uma carga ou o desligamento de um banco de capacitores, e podem ser resultado de circuitos sobrecarregados. (IEEE, 2019).

É possível analisar a variação de tensão em um sistema específico em relação à carga por meio das curvas P-V e Q-V. Além de descrever a variação de tensão, a curva P-V também fornece informações sobre a estabilidade do sistema de energia. A estabilidade de tensão refere-se à capacidade do sistema de manter a tensão em níveis aceitáveis em todas as barras, tanto durante as condições normais de operação quanto após a ocorrência de perturbações. Um problema comum de instabilidade de tensão em sistemas elétricos é a queda de tensão causada pelo fluxo de potência ativa e reativa por meio de reatâncias indutivas da rede elétrica, bem como o aumento progressivo da tensão devido às perdas de carga (KUNDUR, 1994).

A elevação de tensão em sistemas elétricos pode resultar em problemas significativos para equipamentos sensíveis, podendo levar a danos, mau funcionamento e redução da vida útil desses dispositivos (CHAPMAN, 2011).

Alguns dos principais problemas associados à tensão elevada incluem, danos nos componentes eletrônicos, equipamentos eletrônicos sensíveis, como computadores, servidores, controladores lógicos programáveis (CLPs) e dispositivos de comunicação, são altamente sensíveis a variações na tensão de alimentação, problemas de isolamento: A tensão elevada pode comprometer a integridade do isolamento elétrico em equipamentos, cabos e componentes, resultando em falhas de isolamento e riscos de curtos-circuitos, desgaste prematuro de motores elétricos, motores elétricos operando sob tensão elevada podem sofrer um desgaste acelerado, resultando em falhas mecânicas, aumento do consumo de energia e redução da vida útil, além de problemas de aquecimento e mau funcionamento (POMILIO, 2009).

A queda de tensão é um fenômeno que ocorre em sistemas elétricos quando a tensão medida no ponto de carga é menor do que a tensão fornecida pela fonte de alimentação. Um afundamento na tensão, ocorre por períodos curtos (normalmente de 0,5 a 30 ciclos) e é causada por falhas no sistema de energia ou pelo acionamento de cargas pesadas, como motores. Já as interrupções momentâneas, que geralmente duram de 2 a 5 segundos, resultam em uma perda total de tensão e são frequentemente causadas pelas medidas tomadas pelas concessionárias para eliminar falhas transitórias em seus sistemas. Interrupções prolongadas, com duração superior a 1 minuto, são geralmente causadas por falhas permanentes (DUNGAN et al., 2002).

Os afundamentos de tensão e as interrupções são problemas relacionados à qualidade de energia. Com a crescente dependência de equipamentos automatizados para alcançar máxima produtividade e permanecer competitivas, as indústrias são impactadas economicamente por interrupções no fornecimento de energia elétrica. Esse problema pode ser especialmente crítico em ambientes industriais, onde a demanda por energia elétrica é alta e a presença de cargas de grande porte é comum (DUNGAN et al., 2002).

Além da queda excessiva de tensão pode levar a diversos impactos negativos, como mau funcionamento de equipamentos, perda de eficiência energética e até mesmo danos aos componentes elétricos. Em um ambiente industrial, é comum a presença de cargas de grande porte, como motores elétricos, fornos industriais e equipamentos de soldagem, que podem causar uma demanda significativa de corrente. Essas cargas apresentam resistência elétrica e, quando submetidas a uma tensão inferior à nominal, resultam em uma queda de tensão ao longo dos condutores (DUNGAN et al., 2002).

2.4 POTÊNCIA ATIVA

O triângulo das potências é uma representação gráfica utilizada para descrever e analisar as três principais componentes de potência em um sistema elétrico: potência ativa, potência reativa e potência aparente. Nesse contexto, a potência ativa é uma medida da energia efetivamente consumida ou convertida em trabalho útil em um circuito elétrico. A potência ativa, também conhecida como potência real, é

expressa em watts (W) e representa a quantidade de energia transferida ou consumida pelo sistema (MONTICELLI, 2011).

Portanto ela é responsável pela realização de trabalho útil, como acionar motores, iluminar lâmpadas, alimentar equipamentos eletrônicos, entre outros. Sua correta medição e controle são fundamentais para garantir a eficiência energética, o dimensionamento adequado dos sistemas elétricos e o equilíbrio da carga (MONTICELLI, 2011).

2.5 TAPCON

O TAPCON é um sistema de controle automático de comutação de tap em transformadores de potência. Ele é utilizado para ajustar a relação de transformação do transformador, alterando o ponto de conexão do enrolamento secundário por meio de comutadores de tap. Foi projetado para controlar e monitorar os comutadores de tap de forma automática, com base em diferentes parâmetros elétricos, como tensão, corrente, carga, fator de potência, entre outros. Ele permite ajustar o tap do transformador para manter a tensão no valor desejado, mesmo com variações na carga e nas condições de operação do sistema elétrico (MASCHINENFABRIK, 2013).

O TAPCON Dynamic Set Point Control (TDSC) é um sistema de controle avançado de comutação de tap em transformadores de potência. Ele é desenvolvido pela Maschinenfabrik Reinhausen (MR), uma empresa especializada em tecnologias e soluções para controle de transformadores. O TDSC permite o ajuste dinâmico do tap do transformador com base em algoritmos sofisticados e em tempo real. Ele utiliza informações como tensão, corrente, potência, fator de potência e outras grandezas elétricas para determinar a melhor posição do tap, para a manter a tensão dentro dos limites desejados e otimizar a eficiência do sistema (MASCHINENFABRIK, 2023).

3. METODOLOGIA

Este tópico consiste na pesquisa e estipulação do método para solucionar o problema mencionado neste artigo, todas as abordagens do método serão realizadas em relação ao módulo de comutação de tap e ao TAPCON.

Segundo Gil (2002), este estudo de caso adota uma abordagem de pesquisa explicativa, é qualitativa e de natureza básica, com o objetivo de compreender as

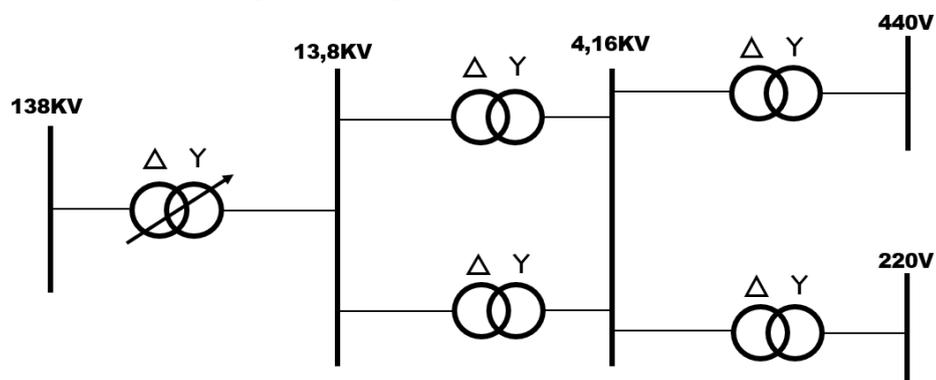
relações de causa e efeito relacionadas a um fenômeno específico. A unidade de análise selecionada é à usina de uma indústria de mineração. A coleta de dados será realizada por meio de equipamentos medidores, diagramas elétricos e observações diretas. Os dados coletados serão analisados por meio de gráficos e cálculos matemáticos. Essa abordagem permitirá uma compreensão mais profunda do problema e chegar na solução.

A variação de tensão em um sistema elétrico pode ocasionar falhas ou até danificar alguns equipamentos mais sensíveis, principalmente de baixa tensão. Com esse estudo será analisado os valores de tensão e de potência e verificada a necessidade de implementar o set point dinâmico.

Na usina em que o estudo está sendo realizado, é alimentada por uma subestação elétrica receptora, que recebe energia da concessionária na tensão de 138kV, que é rebaixada utilizando um transformador de potência com comutador de tap sob carga com potência de 45MVA, para a tensão nominal de entrada da usina que é 13,8kV. Após receber essa tensão, outras subestações dentro da usina, rebaixam para a tensão adequada para cada processo, no caso dos grandes motores em 4,16kV, e em 440V para motores pequenos, circuitos de iluminação, computadores, nobreaks, sistema de automação, sistemas de controle, entre outros, conforme o esquema elétrico na Figura 3.

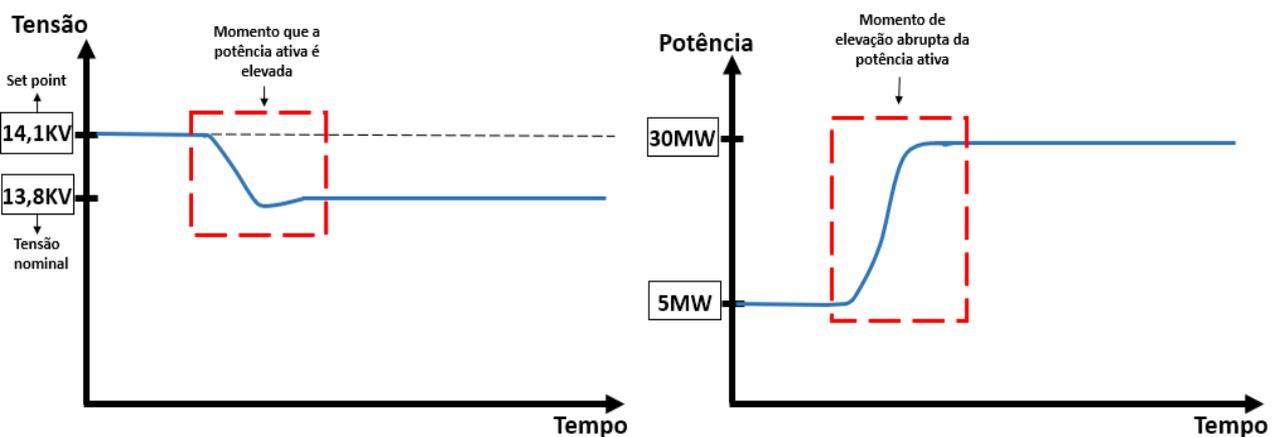
No estudo em questão será tratado somente até a média tensão, pois corrigindo na média, automaticamente também é estabilizado na baixa tensão. Vale lembrar que todos os transformadores das demais subestações da usina não tem comutador de tap sob carga.

Figura 3 - Diagrama elétrico de força da usina



Devido à queda de tensão ocasionado pela grande distância entre o sistema de 13,8kV e o de 4,16kV, junto as enormes quantidades de motores e equipamentos de elevadas potências, somados ultrapassando o valor de 30MW de potência ativa simultaneamente no sistema elétrico referido. É necessário aumentar o valor de referência do comutador de tap para 14,1kV, acima da nominal do transformador e do sistema, para que a queda de tensão seja compensada quando a usina está em plena operação, como mostra a figura abaixo.

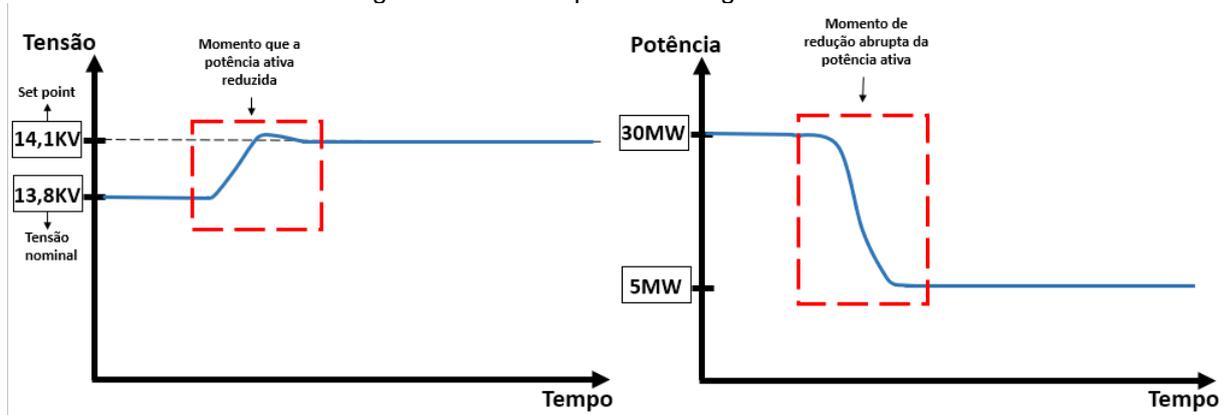
Figura 4 – Análise quando a carga é elevada



Porém, esse valor de referência de 14,1kV é estático, então quando a usina para ou diminui a produção, a potência ativa também diminui, e na maioria dos casos é de forma abrupta por falha em algum equipamento do processo, além de ter motores que atingem até 5MW de potência, logo quando a usina para e desliga mais de um dos motores desse porte, a potência tem um afundamento muito significativo.

Portanto no momento em que a potência é baixa a queda de tensão insignificante, e com a falta de um controle automático do valor de referência do comutador do transformador de 45MVA que alimenta a usina, se mantém com o set point estático de tensão em 14,1kV, então quando não há queda de tensão, a usina recebe a mesma tensão que sai do secundário do transformador, ou seja 14,1kV, conseqüentemente alimentando os motores e demais circuitos elétricos com uma sobretensão, que não é o suficiente para atuar as proteções do sistema e nem danificar de uma vez os equipamentos, porém por um longo período acaba diminuindo gradativamente a vida útil dos equipamentos.

Figura 5 - Análise quando a carga é reduzida



Abaixo temos uma tabela com os dados coletados da subestação receptora de 138kV e da subestação de média tensão das usinas em 4,16kV, mostrando as variações da tensão e potência citadas no artigo, no período de 08/08/2023 a 15/08/2023.

Tabela 1 – Coleta de dados de tensão e corrente

Data-Hora	Tensão Receptora Ref. 14.1KV	Média tensão usina (4.16KV)	Potência
08/08/2023 17:42	14.078	4.178	21.819.688
08/08/2023 18:12	14.022	4.163	21.054.524
08/08/2023 19:54	14.079	4.178	21.933.768
09/08/2023 01:07	14.091	4.191	18.763.292
09/08/2023 02:38	14.109	4.183	23.336.654
09/08/2023 04:26	14.206	4.202	26.617.216
09/08/2023 05:08	14.110	4.183	23.450.380
09/08/2023 05:50	14.117	4.175	26.823.560
09/08/2023 19:05	14.139	4.177	28.163.756
09/08/2023 23:42	14.206	4.255	9.224.625
10/08/2023 00:48	14.171	4.218	17.927.142
10/08/2023 02:00	14.117	4.215	13.300.508
10/08/2023 13:51	14.085	4.188	19.199.792
10/08/2023 14:15	14.224	4.231	18.760.352
10/08/2023 21:04	14.032	4.179	16.972.246
10/08/2023 22:59	14.095	4.193	18.679.290
11/08/2023 00:23	14.201	4.227	17.780.538
11/08/2023 03:23	14.098	4.178	23.924.616
11/08/2023 08:06	14.060	4.173	21.587.886
11/08/2023 11:19	14.101	4.171	26.561.892
11/08/2023 12:25	14.044	4.156	25.740.420
11/08/2023 13:44	13.958	4.128	26.514.314
11/08/2023 18:02	14.195	4.223	18.555.324
11/08/2023 19:27	14.184	4.199	25.370.966
11/08/2023 23:46	14.034	4.188	13.999.312
12/08/2023 11:48	14.093	4.199	16.495.698

12/08/2023 19:01	14.130	4.204	18.284.916
12/08/2023 20:20	14.197	4.235	14.983.791
12/08/2023 22:56	14.184	4.219	18.827.898
13/08/2023 10:53	14.030	4.167	20.703.476
13/08/2023 20:06	14.037	4.172	19.599.958
13/08/2023 22:25	13.979	4.155	19.710.782
13/08/2023 23:31	14.169	4.224	15.761.348
14/08/2023 11:39	13.978	4.161	17.417.338
14/08/2023 11:46	14.030	4.220	3.051.148
14/08/2023 11:52	14.066	4.237	1.178.989
14/08/2023 11:58	14.072	4.238	1.180.151
14/08/2023 12:40	14.184	4.269	2.244.463
14/08/2023 12:46	14.208	4.276	2.279.059
14/08/2023 15:04	14.239	4.281	3.684.846
14/08/2023 16:16	14.089	4.229	6.038.806
14/08/2023 18:05	13.987	4.195	7.074.415
14/08/2023 18:17	13.953	4.197	3.167.162
14/08/2023 18:23	13.942	4.185	5.791.270
14/08/2023 22:24	14.158	4.255	4.144.896
14/08/2023 23:54	14.179	4.229	14.990.384
15/08/2023 13:51	14.113	4.207	15.816.039
15/08/2023 14:33	14.046	4.192	13.910.305
15/08/2023 14:45	14.145	4.239	8.196.315
15/08/2023 15:57	13.984	4.197	5.969.894
15/08/2023 20:28	14.148	4.218	15.454.952

Fonte: Sistema elétrico do estudo de caso.

Aproveitando recursos já existentes no comutador de tap do transformador que alimenta a usina, foi observado a possibilidade de manter a tensão fornecida as subestações da usina em 13,8kV, independente da queda de tensão. Com o TAPCON Dynamic Set Point Control, embarcado no módulo comutador de tap, será o responsável por ajustar o valor de referência do comutador conforme a variação da potência, mesmo que bruscamente, após calcular e definir os parâmetros para inserir no modulo do comutador, o sistema calcula e varia o set point para manter a tensão de 13,8kV na usina.

Logo será informado ao TDSC os valores máximos e mínimos de tensão e potência ativa do sistema elétrico, e a partir desses dados os algoritmos do TAPCON vai verificar os valores de corrente e fator de potência medidos em tempo real, em seguida calcular o set point, caso o resultado seja diferente do valor de referência atual o sistema altera o set point no módulo comutador de tap, considerando as fórmulas na Tabela 2.

Tabela 2 – Fórmulas para calcular o set point

$U_{ref} = \frac{U_{max} - U_0}{P_{max}} \times P_{meas} + U_0 \quad U_{ref} = \frac{U_0 - U_{min}}{0 - P_{min}} \times P_{meas} + U_0$	
Umax - Valor máximo de tensão desejado	Pmeas - Potência ativa medida
Umin - Valor mínimo de tensão desejado	Pmáx - Potência ativa no valor máximo desejado
U0 - Defina o valor desejado quando a potência ativa medida = 0	Pmin - Potência ativa no valor mínimo desejado
Uref - Valor de tensão desejado	

Fonte: Voltage regulator TAPCON Operating instructions.

Para estipular os valores de tensão e potência necessários, foi feito um estudo com os dados coletados, lembrando que existe um range de 100V para cima ou para baixo do valor de referência, após análise dos dados defini como parâmetros os seguintes valores:

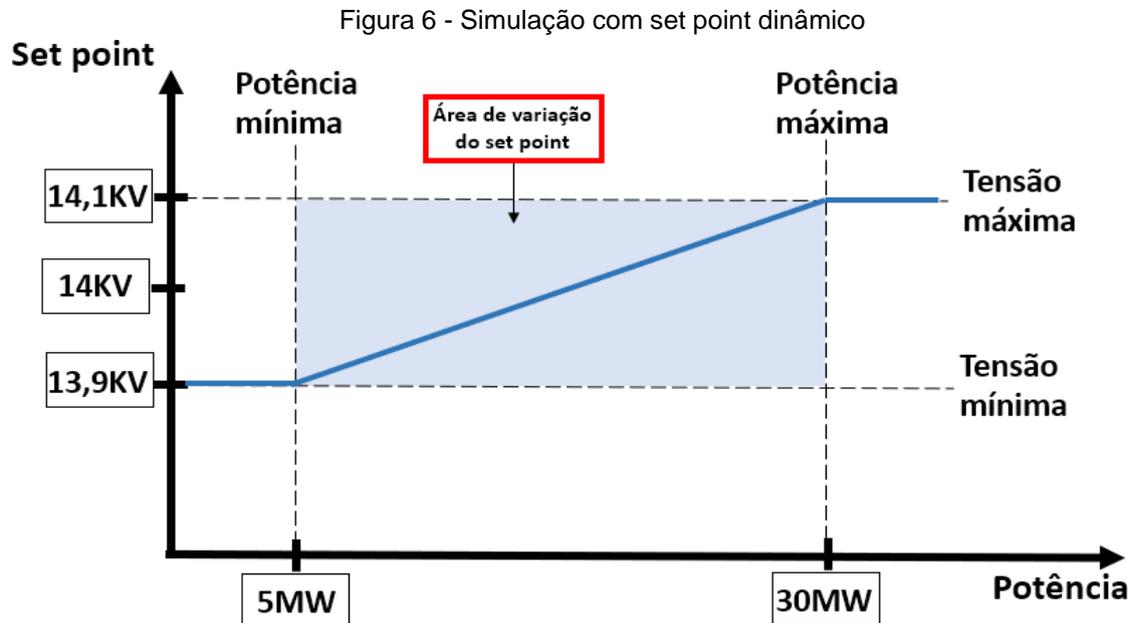
- Tensão mínima: 13,9kV (a tensão mínima do set point não pode ser menor que o valor nominal do sistema;
- Tensão máxima: 14,1kV (tensão já utilizada anteriormente para atender o fornecimento de energia adequado, quando a usina está com potência elevada;
- Potência mínima: 5MW (devido abaixo desse valor não existir queda de tensão significativa);
- Potência máxima: 30MW (é a potência nominal da usina, raramente ultrapassa esse valor).

Antes de inserir os dados no TDSC, foi realizado o cálculo dos set points esperados de acordo com a formula descrita no manual do equipamento (Tabela 2). Após análise dos valores calculado, foi observado a necessidade de limitar os valores de set point, para evitar que o comutador realizasse muitas operações, ocasionando na redução no tempo de vida útil do equipamento.

Vale lembrar que os equipamentos têm uma tolerância de sub e sobretensão, então para realizar os testes limitei apenas a 3 valores de referência, para que possa variar somente quando houver real necessidade de compensar a queda de tensão. Lembrando que existe um range de 100V em relação ao set point, defini o valor de referência 1 em 13,9kV, o segundo em 14kV e o terceiro em 14,1kV.

Inseridos os resultados obtidos nos cálculos no TDSC, e verificado que está operando corretamente, será necessário realizar a coleta de dados dos mesmos

medidores por mais um período, para verificar se a implementação do set point dinâmico está atendendo os resultados esperados.



Após implementar as configurações, foi realizado o teste com a mala de teste de relés da megger MPTR 8430, que realiza a inserção de corrente e tensão, para simular as variações de potência que ocorrem na usina, e verificar a eficácia do método aplicado conforme a Figura 7.

Figura 7 - Simulação em campo com mala de testes Megger



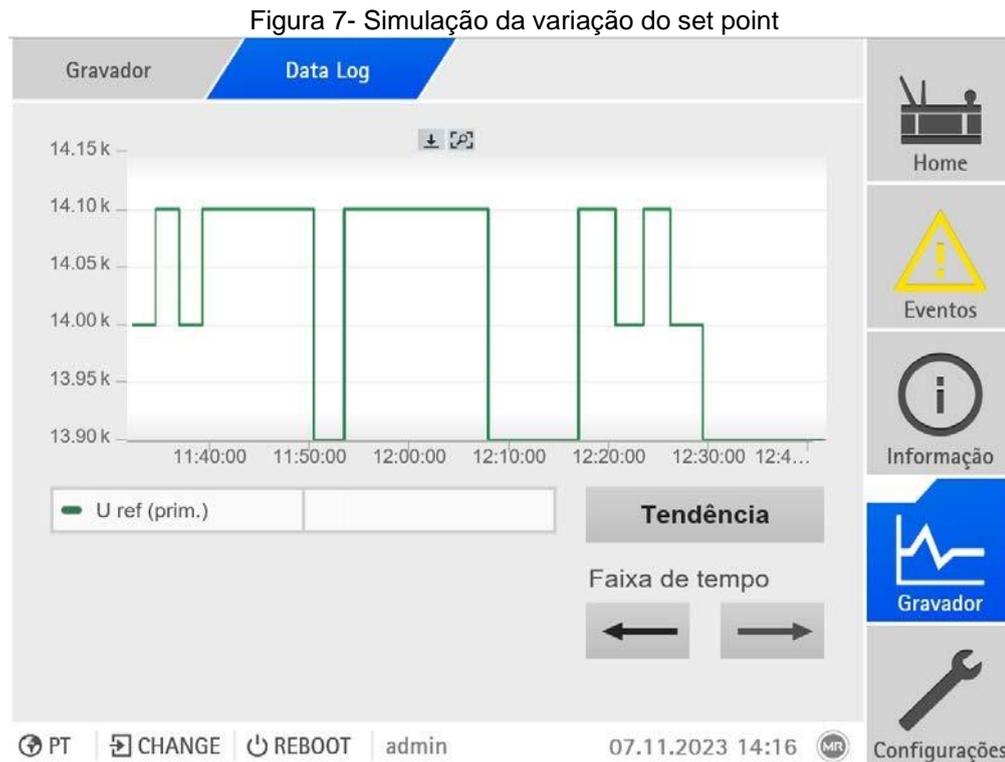
Inicialmente foi configurada a mala de testes, criando uma macro com diversos valores de corrente e tensão, para variar a potência de forma similar à usina em funcionamento. Após configuração, identificamos o modulo responsável por receber os sinais de medição do regulador de tensão, retiramos os sinais do transformador de potencial e do transformador de corrente do modulo. Então ligamos os cabos de tensão e corrente da mala de testes, para realizar a simulação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizado os testes simulados, chegamos nos resultados esperados, inserindo as os sinais de tensão e corrente direto no modulo do comutador de tap do estudo em questão. Conforme as figuras abaixo retiradas do sistema do TAPCOM, foi verificada a variação do set point de acordo com a variação da potência ativa do sistema elétrico.



Fonte: *print screen* do sistema regulador de tensão TAPCON.



Fonte: *print screen* do sistema regulador de tensão TAPCON.

Na imagem acima podemos verificar que os objetivos do estudo foram atingidos, logo quando a usina estiver com a carga elevada, o valor de referência do transformador de potência da receptora de energia elétrica que alimenta a usina também aumenta, fazendo com o que seja compensada a queda de tensão ocasionada pela alta carga ativa no momento.

Por conseguinte, quando a carga da usina está baixa, o set point tende a chegar mais próximo do nominal do sistema elétrico, pois nesse momento não à queda de tensão que necessita ser compensada, e não ocorre o problema de entregar uma sobretensão e correr o risco de danificar os equipamentos.

5. CONCLUSÃO

Para concluir, a partir a implementação da solução proposta, chegamos no resultado esperado, a partir da utilização do TDSC os testes mostram a eficácia mudança do set point, compensando a queda de tenção somente quando necessário, mantendo o sistema mais estável e confiável.

Em breve pretendemos realizar mais testes, porém com a usina operando, realizar as medições após aplicar o método, nos mesmos pontos medidos no início do estudo de caso, para confirmar a solução proposta.

6. REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução nº 505**. ANEEL, 2001.
- Chapman, Stephen. **Electric Machinery Fundamentals**. 5ª edição. New York: McGraw-Hill Education, 2011. 704p.
- DUGAN, Roger. SANTOSO, Surya. MCGRANAGHAN, Mark. e BEATY, Wayne. **Electrical Power Systems Quality** 2ª ed. McGraw Hill Professional, 2002. 528p.
- GE Grid Solutions, **PQM II Power Quality Meter instruction manual for revision 2.35**. Markham: GE Grid Solutions, 2017. 206p. Disponível em: <<https://www.gegridsolutions.com/app/viewfiles.aspx?prod=pqmii&type=3>>. Acesso em: 06 abr. de 2023.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. - São Paulo: Atlas, 2002. 176p.
- GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. 2ª ed., Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HARLOW, James. **Electric Power Transformer Engineering**. 1ª. ed. Boca Raton: CRC Press, 2004. 496p.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009). IEEE, 2019.
- KULKARNI, Shridhar, KHAPARDE, Shrikrishna. **Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics**. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2013. 750p.
- KUNDUR, **Prabha**. **Power system stability and control**. 1ª. ed. New York: McGrawHill, 1994. 1200p.
- LESZCZYNSKI, Jerzy. **Voltage Regulation Selection in Power Distribution Design**. IEEE/1998: Greenville, 1998.
- LLERENA, Maria Tereza Mendoza. **Estimativa do Comportamento de Máquinas Assíncronas Sujeitas a Afundamentos de Tensão**. Porto Alegre: UFRGS, 2006.
- MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 1215p.
- MASCHINENFABRIK Reinhausen, **TAPCON next-generation voltage regulators** Ratisbona: Maschinenfabrik Reinhausen, 2013. 12p. Disponível em: <<http://donar.messe.de/exhibitor/hannovermesse/2017/N264630/tapcon-eng-509790.pdf>>. Acesso em: 3 mai. de 2023.
- MASCHINENFABRIK Reinhausen, **Voltage regulator TAPCON Operating instructions**. Ratisbona: Maschinenfabrik Reinhausen, 2023. 374p. Disponível em: <www.reinhausen.com/fileadmin/downloadcenter/spannungsregler/tapcon_ism/35873_17_en.pdf>. Acesso em: 3 mai. de 2023.

Megger. **User manual model MPRT – Megger protective relay tester.** revision 3. Texas: Megger, 2015. 168p.

MONTICELLI, Alcir. ARIOVALDO Garcia. **Introdução a sistemas de energia elétrica.** Campinas: Editora da Unicamp, 2011. 249p.

POMILIO, Antenor. DECKMANN, Sigmar. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica.** Campinas: UNICAMP, 2009.

SHORT, T. A. **Electric power distribution equipment and systems.** 1. ed. New York: CRC Press, 2006. 318p.