



**Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT**

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE PROTEÇÃO PARA GARANTIR A ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE UMA  
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA COM UMA UTE DE COGERAÇÃO: ESTUDO DE CASO REAL**

**HENRIQUE FANTONI PRIMO(1); HENRIQUE TASSARA CALENZANI(2);  
SM&A(1);SM&A(2);**

**RESUMO**

Uma indústria utiliza gases do processo para produção de energia elétrica, através de uma usina térmica de cogeração, operando em paralelo com a concessionária. Na ocorrência de distúrbios elétricos, como curto-circuito ou perda da concessionária, as proteções atuam de forma a ilhar a usina com as subestações críticas. Porém as proteções do gerador da UTE atuam interrompendo a alimentação da planta. Este artigo irá apresentar a eficácia, comprovada através de oscilografias, da implementação das técnicas de proteção para a realização do ilhamento e do descarte das cargas não prioritárias, p retornar ao ponto de equilíbrio após a ocorrência destes distúrbios.

**PALAVRAS-CHAVE**

Usina Térmica de Cogeração, Estabilidade Transitória, Ilhamento, Rejeição de Cargas, Técnicas de Proteção

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Com a ampliação das plantas industriais, as interrupções no processo se tornam cada vez mais onerosas para as empresas, fazendo com que estas busquem formas alternativas de garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica através da utilização de Geração Distribuída (GD), expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es), independente da potência, tecnologia e fonte de energia. De acordo com o INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética, podem ser considerados como Geração Distribuída (INEE, 17/03/2018):

- Co-geradores (indústrias em geral);
- Geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo;
- Geradores de emergência;
- Geradores para operação no horário de ponta;
- Painéis fotovoltaicos;
- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's.

Indústrias siderúrgicas, geralmente, utilizam os gases liberados dentro dos Altos Fornos para a produção de energia elétrica, através de usinas térmicas de cogeração (UTE). O sistema elétrico, abordado neste artigo, se trata de uma indústria siderúrgica real suprida de energia elétrica por meio de um circuito de 138kV, da concessionária local, em paralelo com uma UTE interna, através de um gerador síncrono de 13,8 kV. A distribuição de energia elétrica dentro da planta industrial é realizada em 20,5kV, através de dois barramentos, sendo as subestações críticas (SE Ferro Gusa, SE Aciaria e SE Caldeira) alimentadas pelo barramento 1 e as demais subestações alimentadas pelo barramento 2. O barramento 1 de 20,5 kV, opera normalmente com o transformador TF-1 de 60/75 MVA 138-20,5 kV (alimentação via concessionária), em paralelo com o transformador TF-Gerador de

15 MVA 13,8-20,5 kV (alimentação via turbogerador). Já no barramento 2 de 20,5 kV, opera apenas transformador TF-2 de 60/75 MVA 138-20,5 kV, (alimentação via concessionária). A alimentação das cargas industriais em média tensão é realizada em 6,9 kV através de transformadores de 20,5-6,9 kV de diferentes potências.

Após a ocorrência de distúrbios elétricos no sistema de distribuição, tais como ocorrência de curto-circuito na linha 138 kV ou perda da concessionária, as proteções da entrada da planta atuam de forma a ilhar a usina com as subestações consideradas críticas para o processo. Entretanto, observou-se que as proteções internas do gerador síncrono atuam, no mesmo instante, desligando a UTE e consequentemente interrompendo a alimentação total da planta. Através de um estudo de estabilidade transitória, elaborado com a utilização do software SKM Power Tools (PTW), foi confirmado que este desligamento da UTE, após o ilhamento, foi provocado devido a atuação do seu respectivo relé de proteção frente a uma instabilidade no gerador síncrono. Esta instabilidade se deve ao fato de que a potência demandada pelas subestações críticas é aproximadamente 25% superior (em torno de 15 MW) a potência máxima fornecida pelo gerador (11,3MW).

Na Figura 1 é apresentado o diagrama unifilar simplificado do sistema, bem como um esquemático da atuação dos relés de proteção descritos anteriormente.

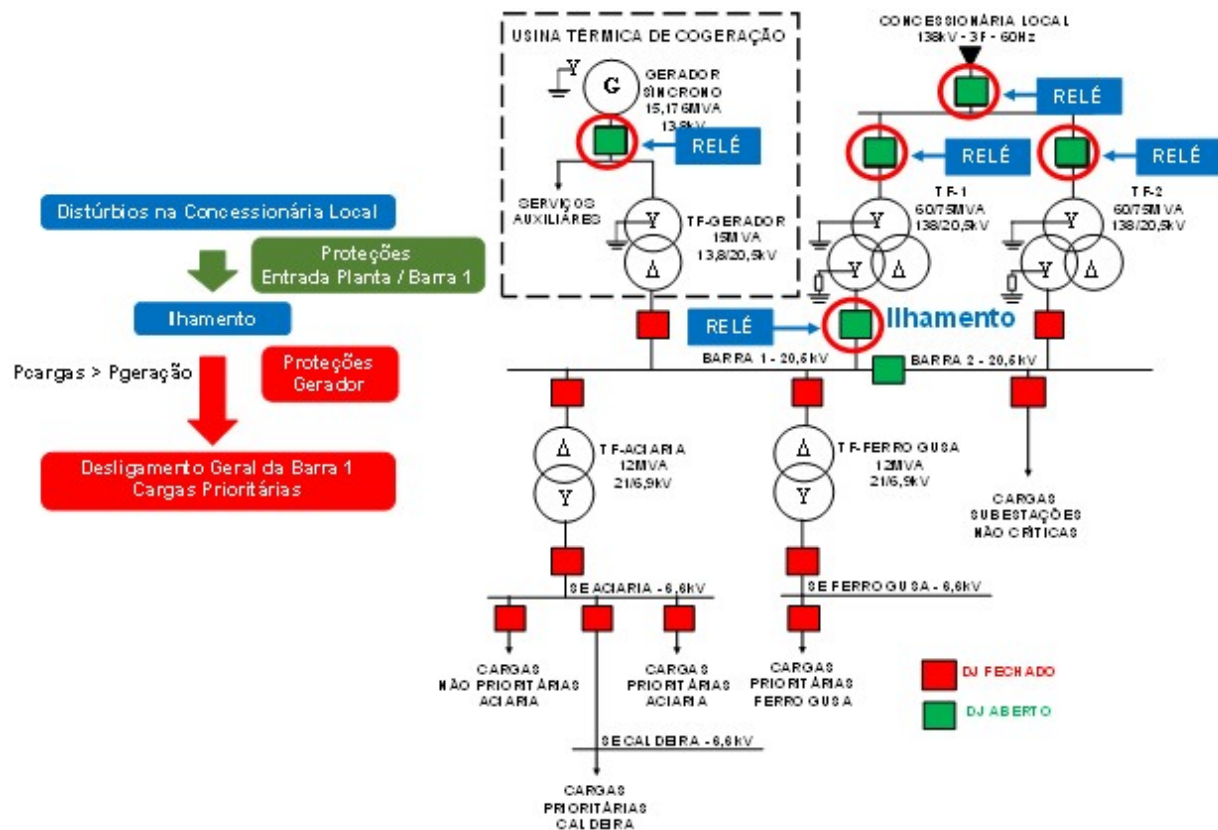


Figura 1 – Diagrama Unifilar Simplificado e Esquemático da atuação do Sistema de Proteção

De forma a solucionar o problema citado, foram analisadas as subestações críticas e definidas as suas cargas não prioritárias, com potência total de aproximadamente 4 MW, a serem descartadas após a ocorrência dos distúrbios elétricos descritos anteriormente. Foram analisados os ajustes e configurações dos dispositivos de proteção existentes, de forma a avaliar e definir as técnicas de proteção atuais a serem implementadas para a solução do problema apresentado, em função do distúrbio ocorrido. Na sequência, os equipamentos necessários para a implementação da solução definida, foram instalados, parametrizados e devidamente testados.

Conforme reportado pela equipe técnica da planta, após a implementação da solução definida, ocorreu um evento de perda da concessionária, seguido de ilhamento e rejeição das cargas não prioritárias, mantendo a estabilidade do sistema. Este artigo apresenta a oscilografia, gerada pelo relé de proteção, do evento ocorrido.

## 2.0 - MODELAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO

A alimentação da planta foi modelada como uma fonte equivalente, a partir do valor de curto-circuito trifásico simétrico fornecido pela concessionária local de energia no ponto de conexão em 138 kV, igual a 13,35 kA.

As demandas das cargas do sistema elétrico da siderurgia analisada, foram divididas de acordo com a prioridade e a criticidade das suas respectivas subestações, conforme Tabela 1

Tabela 1 – Divisão das Cargas por Subestações.

| Subestação    |             | Descrição                       | Demanda (kW) |
|---------------|-------------|---------------------------------|--------------|
| TAG           | Condição    |                                 |              |
| SE Aciaria    | Crítica     | Cargas Prioritárias Aciaria     | 1.777,63     |
|               |             | Cargas Não Prioritárias Aciaria | 3.954,38     |
| SE Caldeiras  | Crítica     | Cargas Prioritárias Caldeiras   | 2.200,00     |
| SE Ferro Gusa | Crítica     | Cargas Prioritárias Ferro Gusa  | 7.078,00     |
| -             | Não Crítica | Cargas Subestações Não Críticas | 40.263,00    |

O gerador síncrono foi modelado como um turbogerador de representação subtransitória, considerando os documentos fornecidos pelo fabricante, incluindo o modelo matemático do gerador síncrono, na forma de blocos e os parâmetros utilizados neste modelo matemático. Na Tabela 2 são apresentadas as informações básicas obtidas nas folhas de dados do gerador.

Tabela 2 – Dados básicos do gerador síncrono.

| DADO | DESCRIÇÃO                 | VALOR  | UNIDADE |
|------|---------------------------|--------|---------|
| S    | Potência Nominal Aparente | 15,176 | MVA     |
| V    | Tensão Nominal            | 13,8   | kV      |
| fp   | Fator de Potência         | 0,85   | Ind.    |
| f    | Frequência Nominal        | 60     | Hz      |

O regulador de velocidade do gerador síncrono analisado é do tipo mecânico-hidráulico. Neste estudo foi utilizado o modelo para turbinas a vapor (turbogeradores).

O regulador de tensão do gerador síncrono analisado é do tipo AC com excitação sem escovas (brushless).

## 3.0 - ANÁLISES DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

De forma a solucionar o problema da instabilidade do gerador síncrono da UTE, foram analisados os impactos dos distúrbios neste sistema elétrico e foram definidas as técnicas de proteção a serem utilizadas considerando as ações necessárias para a realização do ilhamento e da rejeição de cargas.

Quando da ocorrência de perda da concessionária, a UTE passa a tentar alimentar todas as cargas da planta industrial, bem como o sistema elétrico externo. Entretanto, como esta carga é bem superior a potência nominal do gerador síncrono, o mesmo perde o sincronismo e sofre uma variação brusca em sua frequência. No caso específico deste distúrbio, a técnica de proteção definida para a realização do ilhamento, foi a implementação da função de taxa de variação da frequência pelo tempo (ANSI 81  $df/dt$  ou ROCOF - Rate of Change of Frequency). Esta função se baseia na medição da variação da frequência no tempo, fruto de um desequilíbrio entre geração e carga. Quando há uma mudança de carga significativa entre a condição sincronizada e a ilhada, a máquina irá acelerar ou desacelerar antes da resposta do regulador de velocidade. Neste ponto, esta função se torna sensível e atua desligando os respectivos disjuntores. Para reduzir as chances de ocorrência de falsa atuação, o relé ROCOF, é bloqueado para subtensões provocadas por curtos-circuitos ou quando a frequência do sistema ainda estiver acima de um valor pré-determinado.

No caso da ocorrência de um curto-circuito na linha de 138 kV, o gerador síncrono passa a alimentar a falta, porém a frequência permanece praticamente constante. Desta forma, no caso específico deste distúrbio, a técnica de proteção definida para a realização do ilhamento foi a implementação da função de sobrecorrente direcional (ANSI 67) nos relés digitais modelo 7SJ6225, instalados na entrada dos barramentos 1 e 2 do painel de 20,5 kV. Esta função possui as mesmas características da proteção de sobrecorrente convencional (ANSI 50/51), com a diferença de poder ser ajustada para atuar em um determinado sentido de corrente. O gerador síncrono alimenta a falta fazendo circular uma corrente da planta para a linha de 138 kV (sentido reverso a alimentação normal do sistema). Neste ponto, esta função se torna sensível e atua desligando os respectivos disjuntores.

Após o ilhamento, em qualquer um dos casos descritos acima, verificou-se a necessidade da realização da rejeição das cargas definidas como não prioritárias, uma vez que a potência demandada pelas subestações críticas é aproximadamente 25% superior (em torno de 15 MW) a potência máxima fornecida pelo gerador (11,3MW), conforme citado anteriormente. Neste caso foi definido um 2º nível para o ajuste da função  $df/dt$ . Os ajustes das

principais funções de proteção definidos para a realização do ilhamento e da rejeição de cargas, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Ajustes das principais funções de proteção.

| FUNÇÃO DE PROTEÇÃO                      | NÍVEL | AJUSTE                   | UNIDADE  |
|---|-------|--------------------------|--|
| Direcional (ANSI 67)                    | 1º    | 800A instantâneo         | Ilhamento Barra 1                                  |
| Variação da frequência no tempo (df/dt) | 1º    | 8Hz/s com 0,1s @f<59Hz   | Ilhamento Barra 1                                  |
|   | 2º    | 3,5Hz/s com 0,2s @f<59Hz | Rejeição das Cargas não prioritárias da SE Aciária |

#### 4.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

##### 4.1 1ª Simulação: Sem a realização de ilhamento e rejeição de cargas

Nesta simulação considerou-se que o gerador síncrono da UTE está operando em paralelo com a concessionária local, na Barra 1 de 20,5 kV, e ocorre um desligamento na concessionária. Como o sistema de proteção não foi considerado nesta simulação, o gerador síncrono entra em colapso e conseqüentemente ocorre a perda de estabilidade transitória do sistema. Na prática, mesmo que a proteção do sistema não opere, o relé do gerador irá atuar desligando o mesmo. Na Figura 2 pode-se observar que a tensão na Barra 1 decaiu de 1 pu para 0,18 pu após 0,2 s do desligamento, sendo praticamente nula em 5 s, caracterizando um problema por parte do gerador.

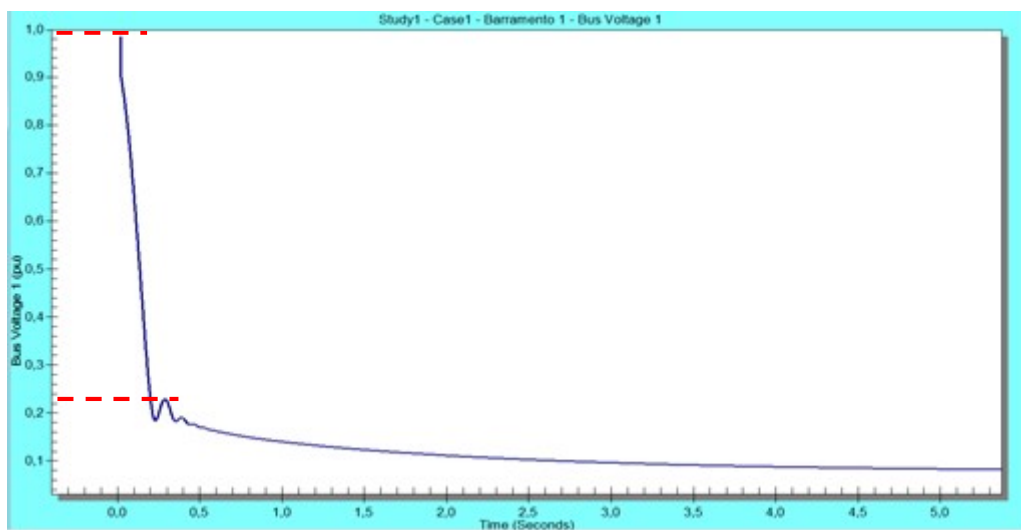


Figura 2 – Tensão na Barra 1 de 20,5 kV na 1ª Simulação

Em relação a frequência na Barra 1, a mesma oscilou e depois aumentou até próximo de 64 Hz em apenas 1 s. O comportamento apresentado nesta curva da frequência na Figura 3, demonstra que o gerador síncrono tentou assumir uma carga cuja demanda era maior do que a sua capacidade nominal, e como não conseguiu a sua frequência disparou.

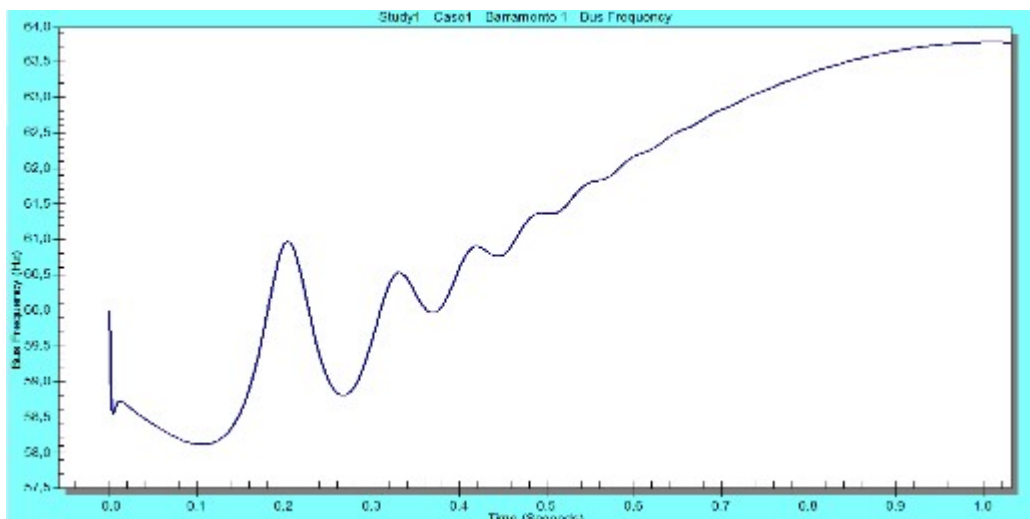


Figura 3 – Frequência na Barra 1 de 20,5 kV na 1ª Simulação

#### 4.2 2ª Simulação: Com a realização de ilhamento e rejeição de cargas

Nesta simulação considerou-se que o gerador síncrono da UTE está operando em paralelo com a concessionária local, alimentando a Barra 1 de 20,5 kV, e ocorre um desligamento na concessionária, porém tem-se a atuação da proteção realizando o ilhamento da UTE e da Barra 1 e a rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria.

Esta simulação tem como objetivo analisar o comportamento do gerador síncrono, considerando as atuações dos dois níveis da função  $df/dt$ , de forma a verificar a eficácia do ilhamento e da rejeição de cargas para garantir a estabilidade transitória do sistema.

Na Tabela 4 é apresentada a sequência de eventos gerada nesta simulação.

Tabela 4 – Sequência de eventos da 2ª simulação.

| EVENTOS                    | FUNÇÃO ANSI DE PROTEÇÃO | TEMPO TOTAL DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO         | CONSEQUÊNCIA                                       |
|----------------------------|-------------------------|--|--|
| 1- Perda de Concessionária | -                       | -  | -  |
| 2- Atuação Relé Proteção   | $df/dt$<br>(1º nível)   | 0,1s após a perda da concessionária        | Ilhamento da Barra 1                               |
| 3- Atuação Relé Proteção   | $df/dt$<br>(2º nível)   | 0,35s após o novo decaimento da frequência | Rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria |

Na Figura 4, pode-se observar que a tensão na Barra 1 decai para menos de 0,65 pu em um tempo de 0,1 s após o desligamento da concessionária. Neste momento, o primeiro nível da função  $df/dt$  atua promovendo o ilhamento da UTE com as subestações críticas na Barra 1 de 20,5 kV. Como a demanda total das cargas das subestações críticas (em torno de 15 MW) é superior a potência nominal do gerador síncrono, da ordem de 11,3 MW, a tensão da Barra 1 tende a decair novamente de forma brusca. Entretanto, 0,35 s após este novo decaimento, o segundo nível da função  $df/dt$  atua promovendo a rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria, através do desligamento de seus respectivos disjuntores. Após esta rejeição, o sistema a demanda passa a ser de aproximadamente o valor da capacidade nominal do gerador síncrono e na sequência, a tensão vai se reestabelecendo até chegar a 1 pu em aproximadamente 10 s.

Destacou-se nesta mesma figura, uma curva pontilhada em roxo, representando a tendência da curva de tensão, caso o segundo nível da função  $df/dt$  não tivesse atuado e consequentemente a rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria não tivesse ocorrido. Esta curva de tendência demonstra que o resultado teria sido o mesmo da 1ª Simulação, ou seja, o sistema teria perdido a estabilidade transitória.



Figura 4 – Tensão na Barra 1 de 20,5 kV na 2ª Simulação

Analisando o gráfico da frequência obtido nesta simulação, verifica-se que a taxa de variação da frequência do instante do desligamento da concessionária até o momento do ilhamento, foi em torno de 12,6 Hz/s, evidenciando a atuação do primeiro nível da função  $df/dt$ . Após o ilhamento, a taxa de variação da frequência foi em torno de 4,6 Hz/s, promovendo a rejeição das cargas não prioritárias, através da atuação do segundo nível desta função. Na sequência, a frequência oscilou até restabelecer próximo de 6 s.

A Figura 5 apresenta o gráfico da frequência obtido através desta simulação, destacando os pontos referentes ao ilhamento e a rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria.

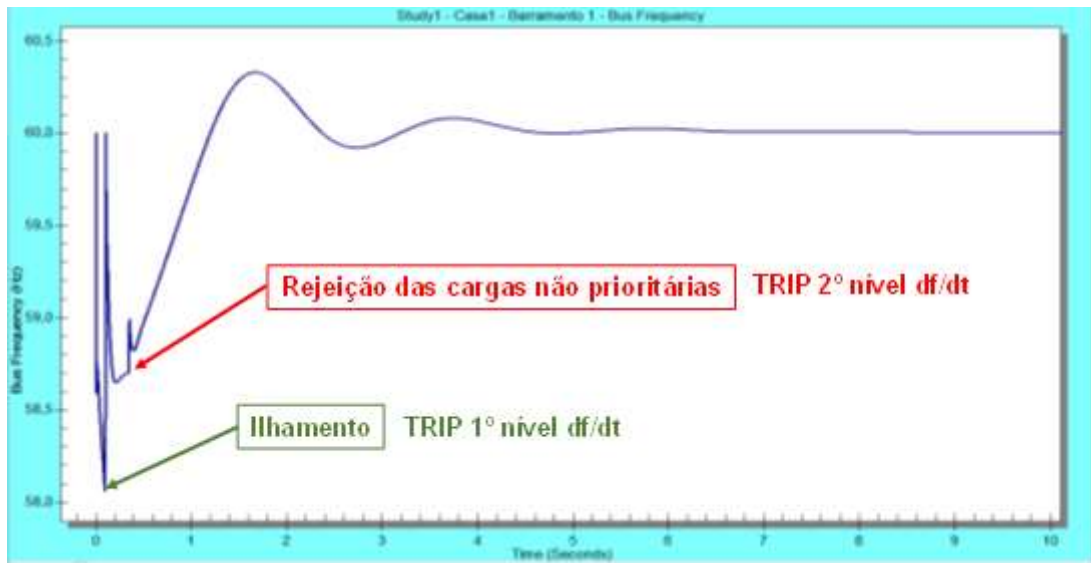


Figura 5 – Frequência na Barra 1 de 20,5 kV na 2ª Simulação

#### 5.0 - OSCILOGRAFIA DE UM EVENTO REAL DE PERDA DA CONCESSIONÁRIA

Após a implementação da solução definida neste trabalho, ocorreu um evento real de perda da concessionária. Entretanto, a função  $df/dt$  do relé atuou em um 1º nível, ilhando a UTE e as subestações críticas, e em um 2º nível, realizando a rejeição das cargas não prioritárias da SE Aciaria e o gerador conseguiu se manter em sincronismo, garantindo a continuidade da alimentação da planta. A Figura 6, apresenta a oscilografia registrada pelo relé com as curvas de tensão e frequência e os status das funções de proteção.

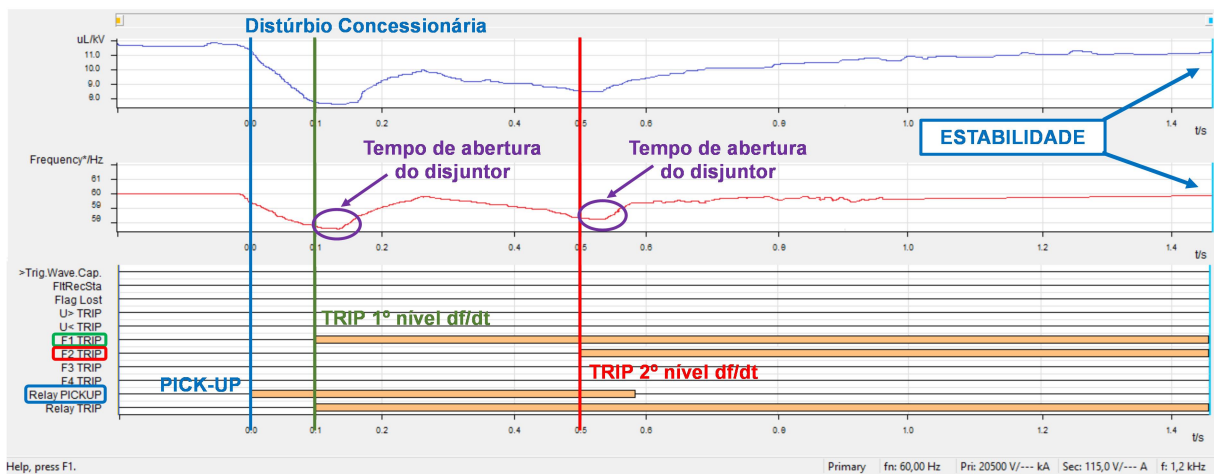


Figura 6 – Oscilografia de um evento real de perda de concessionária

Pode-se observar que o 1º nível da função  $df/dt$  (denominado F1 TRIP), atuou ilhando a UTE em aproximadamente 0,1 s após a ocorrência do evento. Este tempo de atuação real, obtido na oscilografia, está totalmente coerente com o ajuste definido para este nível, conforme apresentados na Tabela 3. Na oscilografia pode-se perceber também que mesmo após a atuação do 1º nível da função a frequência continua caindo durante aproximadamente 50 ms. Este tempo corresponde ao tempo de abertura do disjuntor e tem que ser levado em consideração durante a definição dos ajustes das funções de proteção.

Na sequência, verifica-se que a UTE tenta alimentar as subestações críticas, porém, pelo fato da demanda destas das cargas instaladas nestas subestações serem superiores a potência do gerador síncrono, a frequência sofre uma nova variação brusca (em torno de 4,6 Hz/s), porém com uma taxa de decaimento menor em relação a variação anterior (em torno de 12,6 Hz/s). Neste momento, o 2º nível da função  $df/dt$  (denominado F2 TRIP), atuou rejeitando as cargas não prioritárias na SE Aciaria, em aproximadamente 0,25 s. Novamente há coerência entre o

tempo real, obtido na oscilografia, e o tempo definido para o respectivo nível. Após a atuação do 2º nível da função a frequência continua caindo durante aproximadamente 50 ms, sendo este o tempo de abertura do disjuntor.

Após a atuação deste 2º nível da função  $df/dt$  e a abertura do disjuntor, a tensão e a frequência se normalizaram gradativamente, caracterizando que o gerador conseguiu retornar ao seu ponto de sincronismo, garantindo a estabilidade transitória do sistema.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Com o foco de garantir a continuidade da alimentação da indústria siderúrgica analisada, quando da ocorrência de distúrbios na concessionária local de energia, foram definidas técnicas de proteção, com a utilização de dois níveis da função  $df/dt$  e um nível da função ANSI 67, para a realização do ilhamento da usina termoeletrica de cogeração (UTE) da planta e da rejeição de cargas não prioritárias. Foram apresentadas simulações de estabilidade transitórias, que permitiram a consolidação dos parâmetros necessários para a definição das técnicas utilizadas.

Neste estudo de caso foi apresentada e analisada uma oscilografia, gerada pelo relé de proteção 7RW80, de um evento real de perda da concessionária, ocorrido após a implementação da solução, implementação das funções ANSI 81  $df/dt$  e ANSI 67, definida neste artigo. Esta oscilografia confirma que a função ANSI 81  $df/dt$  atuou corretamente em um 1º nível, ilhando a UTE e as subestações críticas, e posteriormente em um 2º nível, realizando a rejeição das cargas não prioritárias. Neste caso, o gerador conseguiu se manter em sincronismo, garantindo a estabilidade transitória do sistema.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dugan R. C., McGranaghan M. F., Santoso S e Beaty H. W. Electrical Power Systems Quality. 2ª ed., McGrall-Hill, 2012.
- (2) IEEE Std. 242-2001. IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems. IEEE-SA Standards Board (BUFF BOOK).
- (3) IEEE Std. C37.102-2006. IEEE Guide for AC Generator Protection. IEEE Power Engineering Society.
- (4) IEEE Power Engineering Society. IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators. Special Publication of the IEEE Power System Relaying Committee. 2011.
- (5) Kindermann G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência – Volume 3. UFSC Lab Plan EEL. Florianópolis - SC, 2008.
- (6) Kundur P., Paserba J., Ajarapu V., Andersson G., Bose A., Canizares C, Hatziaargyriou N, Hill D., Stankovic A., Taylor C., Cutsem T. V. e Vittal V. Definition and Classification of Power System Stability. IEEE / CIGRE Joint Task Force Stability Teeficaz and Definitions. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, nº 2, p. 1387-1404, May 2004.
- (7) Kundur P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill. Paolo Alto, California, USA, 1994.
- (8) Vieira J. C. M., Freitas W., Xu W., Morelato A. Performance of Frequency Relays for Distributed Generation Protection. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, nº 3, Julho de 2006.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



### (1) Henrique Fantoni Primo

Gerente Técnico do Departamento de Energia da SM&A Sistemas Elétricos LTDA. Graduado em Engenharia Elétrica no CEFET-MG; Pós-graduado em Engenharia Elétrica – Especialização em sistemas de energia elétrica – Ênfase em qualidade da energia elétrica – UFGM; Mestrado em Engenharia Elétrica – Área de Concentração: Engenharia de Potência, Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia (CEQE) – UFGM; Professor no curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica – PUC MG. Principal publicação: Harmonic Mitigation Techniques Applied to Industrial Power Systems: Real Case Study With Measurements, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2018, DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395585.



### (2) Henrique Tassara Calenzani

Engenheiro do Departamento de Energia da SM&A Sistemas Elétricos LTDA. Graduado em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG); Pós-graduado em Engenharia Elétrica – Especialização em Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica – PUC MG. Principal publicação: Transient Recovery Voltage: A Case Study Applied to Industrial Systems, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2018, DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395592.