



**GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS EMPRESARIAIS E DE GESTÃO CORPORATIVA E DA INOVAÇÃO E
DA EDUCAÇÃO E DE REGULAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO - GEC**

**INFO_SUPERVISAO – UM NOVO CONCEITO NO PROCESSO DE ANÁLISE PREVENTIVA DOS
CARREGAMENTOS DE TRANSFORMADORES NA ELETRONORTE**

**JOÃO PAULO FERNANDES LIMA(1); RODOLFO MOACIR SEABRA JUNIOR(1)
ELETROBRAS ELETRONORTE(1)**

RESUMO

O INFO_SUPERVISAO é uma aplicação que calcula, de forma automatizada, o carregamento máximo diário realizado nas transformações da Eletronorte. Além do carregamento máximo em situação normal de operação (condição N), o INFO_SUPERVISAO também calcula uma estimativa do carregamento dos transformadores em situações de contingência simples (N-1) e contingência dupla (N-2), permitindo à Eletronorte uma gestão mais eficiente dos carregamentos dos seus ativos. Verificação do atendimento ao critério N-1 e planejamento de intervenções são algumas das aplicações práticas. Antes da implementação do programa, o cálculo do carregamento máximo era realizado manualmente com o uso de planilhas Excel, demandando elevado custo de homem-hora.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, carregamento, gestão.

1.0 INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são equipamentos essenciais para o sistema elétrico. O monitoramento do carregamento desses equipamentos é de suma importância, tendo em vista que a vida útil dos mesmos pode ser reduzida em função de carregamentos acima dos seus limites operacionais. Além do carregamento em situação normal de operação (condição N), é importante também monitorar/estimar o carregamento dos transformadores em situações de contingência simples (condição N-1), em que a perda de um dos transformadores provoca elevação de carregamento nos demais equipamentos que operam em paralelo numa mesma instalação, podendo acarretar sobrecargas inadmissíveis e consequente perda de vida útil. Nesse sentido, visando atender a necessidade de monitoramento automatizado do carregamento de seus transformadores, a Eletronorte desenvolveu o INFO_SUPERVISAO.

2.0 METODOLOGIA UTILIZADA NO INFO_SUPERVISAO

O INFO_SUPERVISAO é uma aplicação que consome dados históricos do sistema de supervisão da Eletronorte e neles aplica cálculos para identificação de carregamentos máximos e violações de tensão em subestações, possibilitando a emissão de diversos relatórios para acompanhamento desses resultados por equipes de especialistas que podem fundamentar decisões relacionadas às condições de operação no Sistema Elétrico da Eletronorte. A Figura 1 apresenta a tela de entrada, na qual o usuário pode selecionar os parâmetros de sua pesquisa (regional/instalação/relação de tensão), a base de tempo (diária, mensal, quadrimestral e anual), bem como definir filtros de exibição com a definição dos valores mínimo e máximo.

Carregamentos Máximos por Subestações

Parâmetros de Pesquisa:

Regional: MT Instalação: -- Instalação -- Relação de Tensão: -- Relação de Tensi -- Base de Tempo: Diário A partir de: 13/07/2021 Até: 13/07/2021

Carregamento N-1 Mínimo: 65 Máximo: ☐ Somente possíveis espúrios

FIGURA 1 – Tela de entrada do INFO_SUPERVISAO

Uma das funcionalidades do INFO_SUPERVISAO é obter o carregamento máximo diário em cada transformação da Eletronorte. Para tal, o programa carrega, em sua memória, as medidas de potência ativa e reativa (de cada transformador) aquisitadas pelo sistema supervisorio. Essa sistemática é ilustrada na tabela 1 para a Subestação Sorriso, de propriedade da Eletronorte, a qual está localizada no interior do estado do Mato Grosso, cuja transformação é composta por três transformadores 230/69 kV – 30 MVA. Por simplicidade, a Tabela 1 apresenta apenas um subconjunto das medidas aquisitadas ao longo do dia 17.08.2021, porém o programa obtém 100% das medidas de potência ativa e reativa ao longo do dia para cada transformador com intervalo de amostragem de 30 segundos.

TABELA 1 – Sistemática de cálculo de carregamento na transformação

Data/Hora	Transformador 01		Transformador 02		Transformador 03		Soma		
	P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	P [MW]	Q [Mvar]	P total [MW]	Q total [Mvar]	S total [MVA]
17/08/2021 23:40:00	20,6	11,4	21,7	12,5	21,1	12,0	63,4	35,9	72,82
17/08/2021 23:40:30	20,6	11,4	21,6	12,6	21,1	12,0	63,4	36,0	72,88
17/08/2021 23:41:00	20,7	11,5	21,7	12,5	21,2	12,0	63,6	36,0	73,13
17/08/2021 23:41:30	20,8	11,5	21,8	12,6	21,3	12,0	63,9	36,1	73,38
17/08/2021 23:42:00	20,8	11,5	21,8	12,5	21,3	12,0	63,8	35,9	73,24
17/08/2021 23:42:30	20,7	11,5	21,7	12,5	21,2	12,0	63,6	35,9	73,01
17/08/2021 23:43:00	20,7	11,4	21,8	12,5	21,2	12,0	63,7	35,9	73,13
17/08/2021 23:43:30	20,7	11,5	21,8	12,6	21,2	12,0	63,7	36,1	73,17
17/08/2021 23:44:00	20,8	11,5	21,8	12,5	21,3	12,0	63,9	36,0	73,33
17/08/2021 23:44:30	20,8	11,6	21,8	12,5	21,3	12,0	63,8	36,1	73,31
17/08/2021 23:45:00	20,9	11,6	21,8	12,5	21,3	12,1	64,0	36,2	73,54
17/08/2021 23:45:30	20,7	11,5	21,8	12,6	21,3	12,0	63,8	36,1	73,29
17/08/2021 23:46:00	20,9	11,5	21,8	12,6	21,4	12,0	64,1	36,1	73,50
17/08/2021 23:46:30	20,7	11,5	21,9	12,6	21,3	12,1	63,9	36,2	73,44
17/08/2021 23:47:00	20,8	11,5	21,9	12,6	21,3	12,0	64,0	36,1	73,47
17/08/2021 23:47:30	20,8	11,5	21,7	12,5	21,2	12,0	63,7	35,9	73,14
17/08/2021 23:48:00	20,7	11,5	21,8	12,6	21,3	12,0	63,8	36,1	73,27
17/08/2021 23:48:30	20,6	11,5	21,7	12,5	21,1	12,0	63,4	35,9	72,86
17/08/2021 23:49:00	20,7	11,5	21,7	12,5	21,2	12,0	63,6	35,9	73,06
17/08/2021 23:49:30	20,7	11,4	21,8	12,5	21,2	12,0	63,7	35,9	73,11
17/08/2021 23:50:00	20,6	11,4	21,6	12,4	21,1	11,9	63,3	35,7	72,65
17/08/2021 23:50:30	20,6	11,4	21,7	12,4	21,1	11,9	63,4	35,8	72,84

A partir dessas medidas, o programa calcula, para cada instante de tempo, os valores de potência ativa total e potência reativa total da subestação, bem como a potência aparente total em MVA, gerando internamente uma tabela com valores de carregamento calculados a cada 30 segundos ao longo do dia, conforme mostra a Tabela 1.

Na sequência, o programa percorre essa tabela e identifica o ponto de operação com o carregamento máximo do dia, o qual é registrado em seu banco de dados. Por exemplo, no caso da transformação da SE Sorriso, o carregamento máximo do dia 17.08.2021, igual a 73,54 MVA, ocorreu as 23h45 (destaque em amarelo na Tabela 1).

Outra funcionalidade importante do INFO_SUPERVISAO é o algoritmo de identificação de medidas espúrias. Eventualmente o sistema de supervisão pode aquisitar uma medida com valor muito acima das demais e visivelmente fora da tendência natural da curva de carga. A Figura 2 apresenta um exemplo dessa situação, na qual pode-se identificar uma medida espúria em torno de 20 Mvar na curva diária de potência reativa medida para

um dos transformadores da SE Nobres.

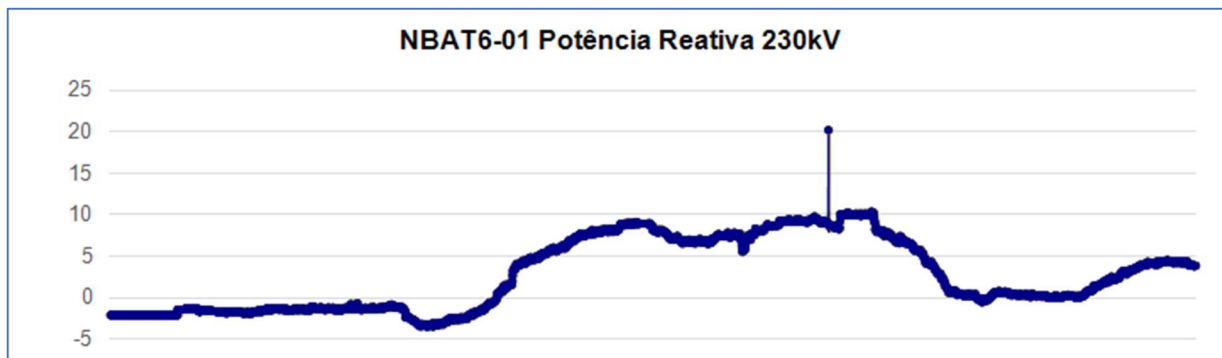


FIGURA 2 – Medida espúria

Para conseguir identificar e desconsiderar essas medidas espúrias, o INFO_SUPERVISAO utiliza, em seu algoritmo, a seguinte sequência de ações:

- Identificação do ponto de operação com o carregamento máximo do dia;
- Identificação das 10 medidas anteriores e das 10 medidas posteriores ao carregamento máximo;
- Cálculo do valor médio das 10 medidas anteriores e das 10 medidas posteriores ao carregamento máximo;
- Cálculo da diferença entre o carregamento máximo e o valor médio das 10 medidas posteriores;
- Cálculo da diferença entre o carregamento máximo e o valor médio das 10 medidas anteriores;
- Caso as duas diferenças acima sejam maiores que 10%, o valor do carregamento máximo é considerado como medida espúria, sendo descartado do banco de dados;
- O sistema busca o próximo valor do carregamento máximo para executar novamente o processo de validação;
- Quando o valor do carregamento máximo é considerado válido, o mesmo é registrado no banco de dados.

Esse algoritmo foi testado em várias situações reais, eliminando com sucesso as medidas espúrias e garantindo a confiabilidade dos carregamentos máximos registrados no banco de dados do INFO_SUPERVISAO

A Figura 3 apresenta a tela de saída do INFO_SUPERVISAO, obtida por meio da pesquisa do carregamento máximo diário verificado em algumas transformações da Eletronorte no dia 13.07.2021. São apresentados os seguintes dados:

- A identificação da instalação e da transformação pela sua relação de tensão;
- Base de tempo (diária, mensal, quadrimestral e anual);
- Data e hora em que ocorreu o carregamento máximo na transformação;
- Capacidade (em MVA) da transformação;
- Número de equipamentos em operação e número total de equipamentos da transformação;
- Valores totais (soma de todos os transformadores) de potência ativa, reativa e aparente referentes ao carregamento máximo;
- Carregamento percentual da transformação (configuração N);
- Carregamento máximo percentual de equipamento, calculado pelo valor da maior corrente (dentre todos os transformadores) dividida pela corrente nominal
- Carregamento percentual estimado para contingência simples (condição N-1) tendo como base a capacidade nominal;
- Carregamento percentual estimado para contingência simples (condição N-1) tendo como base a capacidade de curta duração;
- Carregamento percentual estimado para contingência dupla (condição N-2) tendo como base a capacidade nominal.

Instalação (kV)	Relação de Tensão Base de	Tempo	Data	Hora	Capacidade (MVA)	Eqps em Operação	Total de Equipamentos	P Total (MW)	Q Total (Mvar)	S Total (MVA)	Carregamento N (%) - Subestação	Carregamento Máximo Eqp. (%)	Carregamento N-1 (%)	Carregamento N-1 (%)	Carregamento N-2 (%)
	Estimado - Base Emerg. 4h												Estimado - Base Nominal	Estimado - Base Nominal	
SE Lucas do Rio Verde	230/138 kV	Diário	13/07/2021	00:00:00	75	1	1	51,6	9,34	52,44	69,92	67,74	69,92	0	0
SE Nobres	230/138 kV	Diário	13/07/2021	17:09:30	200	2	2	75,85	20,09	78,47	39,23	39,5	65,39	78,47	0
SE Sinop	230/138 kV	Diário	13/07/2021	17:25:00	300	3	3	140,34	39,76	145,86	48,62	51	71,5	72,93	145,86
SE Sorriso	230/69 kV	Diário	13/07/2021	23:00:00	90	3	3	62,16	34,78	71,23	79,14	91,48	116,39	118,72	237,43

FIGURA 3 – Tela de saída do INFO-SUPERVISAO

Observa-se que, além do carregamento máximo diário em regime normal de operação (condição N), o INFO_SUPERVISAO permite estimar o carregamento na condição N-1, ou seja, o carregamento que teria sido verificado nos transformadores remanescentes no caso da ocorrência da perda de um dos transformadores da instalação. Esse cálculo estimado é realizado por meio da divisão entre o carregamento percentual máximo diário multiplicado pelo número total de transformadores e dividido pelo número total menos 1.

Por exemplo, conforme a Figura 3, a SE Sorriso apresentou carregamento máximo do dia 13.07.2021 igual a 79,14%. Como essa instalação possui 3 transformadores de mesma potência e com parâmetros elétricos idênticos, o carregamento estimado para a contingência simples (condição N-1) pode ser calculado da seguinte forma:

$$\text{Carregamento (N-1)} = (79,14 * 3) / 2 = 118,7\%$$

Seguindo essa mesma sistemática, o programa também realiza o cálculo estimado do carregamento para contingência simples (condição N-1) tendo como base a capacidade de curta duração e o carregamento percentual estimado para contingência dupla (condição N-2) tendo como base a capacidade nominal.

Além dos relatórios diários, o programa permite fazer relatórios mensais, trimestrais e anuais com os valores máximos de carregamento em cada base de tempo solicitada pelo usuário, conforme mostrado nas Figuras 4 e 5. Nesses casos, o programa percorre todo o histórico de carregamentos registrados na base de tempo desejada pelo usuário e identifica o valor máximo para a geração dos relatórios. Esses relatórios são extremamente úteis para análises expeditas que anteriormente demandavam uma grande quantidade de tempo para sua realização.

Instalação	Relação de Tensão	Base de Tempo	Data	Hora	Capacidade (MVA)	Eqps em Operação	Total de Equipamentos	P Total (MW)	Q Total (Mvar)	S Total (MVA)	Carregamento N (%) - Subestação	Carregamento Máximo Eqp. (%)	Carregamento N-1 (%)	Carregamento N-1 (%)	Carregamento N-2 (%)
	(kV)												Estimado - Base Emerg. 4h		
SE Ji-Paraná	230/69 kV	2021.05	28/05/2021	16:25:00	180	3	3	86,16	49,47	99,35	55,2	53,12	78,85	82,79	165,58
SE Ji-Paraná	230/69 kV	2021.06	09/06/2021	16:10:00	180	3	3	88,16	46,4	99,63	55,35	53,12	79,07	83,03	166,05
SE Ji-Paraná	230/69 kV	2021.07	27/07/2021	15:53:00	180	3	3	93,07	53,93	107,57	59,76	56,44	85,37	89,64	179,28

FIGURA 4 – Relatório com base de tempo mensal

Instalação	Relação de Tensão (kV)	Base de Tempo	Data	Hora	Capacidade (MVA)	Eqps em Operação	Total de Equipamentos	P Total (MW)	Q Total (Mvar)	S Total (MVA)	Carregamento N (%) - Subestação	Carregamento Máximo Eqp. (%)	Carregamento N-1 (%)	Carregamento N-1 (%)	Carregamento N-2 (%)
													Estimado - Base Emerg. 4h	Estimado - Base Nominal	Estimado - Base Nominal
SE Ji-Paraná	230/69 kV	2020	05/11/2020	15:22:00	180	2	3	99,22	50,88	111,51	61,95	89,64	88,5	92,93	185,85
SE Ji-Paraná	230/69 kV	2021	17/08/2021	16:23:30	180	3	3	94,87	55,22	109,77	60,98	58,1	87,12	91,48	182,95

FIGURA 5 – Relatório com base de tempo anual

É possível também a geração de relatórios personalizados utilizando os filtros. Por exemplo, é possível filtrar apenas os equipamentos com carregamento acima de 90%.

3.0 APLICAÇÕES PRÁTICAS

Nessa seção, serão apresentadas algumas aplicações práticas do INFO_SUPERVISAO na Eletronorte.

3.1 Atendimento ao critério N-1

O N-1 é o critério adotado para o planejamento da expansão e para a operação do SIN. De acordo com o critério, a perda simples de um dos elementos do sistema não pode acarretar violação nos critérios de operação do SIN (1).

Para a verificação do atendimento ao critério N-1 nas transformações da Eletronorte, realiza-se a simulação da perda de um dos transformadores de uma determinada subestação e compara-se o carregamento dos transformadores remanescentes com suas respectivas capacidades de curta duração (4 horas).

O INFO_SUPERVISAO permite fazer essa comparação de forma rápida e simples. Para ilustrar essa aplicação, a Figura 6 apresenta o relatório de carregamento máximo anual para o ano de 2020 para quatro subestações da Eletronorte. A coluna em destaque se refere ao carregamento percentual estimado para contingência simples (condição N-1) tendo como base a capacidade de curta duração (4 horas). Para que o critério N-1 seja atendido, esse carregamento percentual tem que ser menor ou igual a 100%.

Com base na Figura 6, observa-se que duas transformações atenderam o critério N-1 no ano de 2020 e outras duas não atenderam. O não atendimento ao critério N-1 é um sinalizador de necessidade de expansão do sistema elétrico. Para viabilizar o atendimento a esse critério nas transformações de fronteira com a rede básica, pode-se, por exemplo, indicar as seguintes soluções:

- Aumento da capacidade de transformação da subestação, agregando novos transformadores;
- Construção de novas subestações de fronteira, as quais absorverão parte da carga atendida pelas subestações existentes.

Instalação	Relação de Base de Tensão (kV)	Tempo	Data	Hora	Capacidade (MVA)	Eqps em Operação	Total de Equipamentos	P Total (MW)	Q Total (Mvar)	S Total (MVA)	Carregamento N (%) - Subestação	Carregamento Máximo Eqp. (%)	Carregamento N-1 (%) Estimado - Base Emerg. 4h	Carregamento N-1 (%) Estimado - Base Nominal	Carregamento N-2 (%) Estimado - Base Nominal
SE Ji-Paraná	230/138 kV	2020	10/09/2020	16:31:00	200	2	2	107,72	47,35	117,67	58,83	57,13	112,06	117,67	0
SE Ji-Paraná	230/69 kV	2020	05/11/2020	15:22:00	180	2	3	99,22	50,88	111,51	61,95	89,64	88,5	92,93	185,85
SE Pimenta Bueno	230/138 kV	2020	30/04/2020	05:42:30	110	0	2	-77,92	8,45	78,38	71,25	0	135,6	142,51	0
SE Porto Velho	230/69 kV	2020	09/10/2020	15:51:00	400	4	4	276,57	105,1	295,87	73,97	75,15	93,93	98,62	147,94

FIGURA 6 – Verificação de atendimento ao critério N-1

3.2 Identificação de risco de sobrecarga inadmissível

Os transformadores da SE Sorriso possuem capacidade de emergência de curta duração igual a 120%. Dessa forma, caso o carregamento estimado para a condição N-1 seja superior a 120% existe risco de sobrecarga inadmissível nessa transformação caso ocorra a contingência simples na transformação. Situações como essa podem ser facilmente identificadas pelo INFO_SUPERVISAO.

Conforme mostra a Figura 7, o INFO_SUPERVISAO identificou situações de sobrecarga inadmissível estimada em condição N-1 para a SE Sorriso, no segundo semestre de 2020. Os valores de carregamento estimados foram iguais a 131,5%, 137,5% e 141% respectivamente para os meses de agosto, setembro e outubro de 2020, todos verificados para o período noturno. Isso significa que, caso tivesse ocorrido a perda de um dos transformadores para esses pontos de operação, a elevada sobrecarga nos equipamentos remanescentes poderia acarretar perda de vida útil, com prejuízos para a Eletronorte e para o SIN.

Relação de Tensão	Base de Tempo	Data	Hora	Capacidade (MVA)	Eqps em Operação	Total de Equipamentos	P Total (MW)	Q Total (Mvar)	S Total (MVA)	Carregamento N (%) - Subestação	Carregamento Máximo Equip. (%)	Carregamento N-1 (%)	Carregamento N-1 (%)	Carregamento N-2 (%)	
												Estimado - Base Emerg. 4h	Estimado - Base Nominal	Estimado - Base Nominal	
SE Sorriso	230/69 kV	2020.08	01/08/2020	02:01:30	90	0	3	62,5	48,24	78,95	87,72	0	129,01	131,58	263,17
SE Sorriso	230/69 kV	2020.09	30/09/2020	22:27:30	90	3	3	71,42	41,36	82,53	91,7	104,18	134,86	137,55	275,1
SE Sorriso	230/69 kV	2020.10	05/10/2020	22:38:00	90	3	3	74,33	40,47	84,63	94,04	100,74	138,29	141,05	282,1

FIGURA 7 – Situações de risco de sobrecarga inadmissível na SE Sorriso

É importante salientar que, essas situações não haviam sido previstas pela distribuidora nos estudos de planejamento da operação elétrica de curto prazo. Após aprofundamento dessa condição operacional pela agentes envolvidos, identificou-se que o elevado carregamento não previsto nos transformadores da SE Sorriso foi favorecido pela carga de pivôs de irrigação que estavam sendo acionados automaticamente no período noturno em função da escassez de chuvas. A partir daí, medidas operativas foram adotadas e um Sistema Especial de Proteção foi recomendado e implantado para reduzir automaticamente a carga dos transformadores em situações de sobrecarga.

Outras situações de sobrecarga inadmissível em condição N-1 também foram identificadas pelo INFO_SUPERVISAO para outras instalações da Eletronorte, permitindo uma gestão mais assertiva sobre os seus ativos.

3.3 Planejamento de intervenções

Uma outra aplicação é a possibilidade de realizar o planejamento das intervenções de longa duração nos transformadores tendo como base, dentre outros fatores, a curva de carga obtida por meio do programa.

Para ilustrar essa aplicação, a Figura 8 apresenta a curva de carga com base de tempo mensal obtida pelo INFO_SUPERVISAO para uma das subestações da Eletronorte. A curva apresenta os carregamentos estimados para a condição N-2, ou seja, considerando a indisponibilidade do transformador sob intervenção mais a eventual perda de outro transformador.

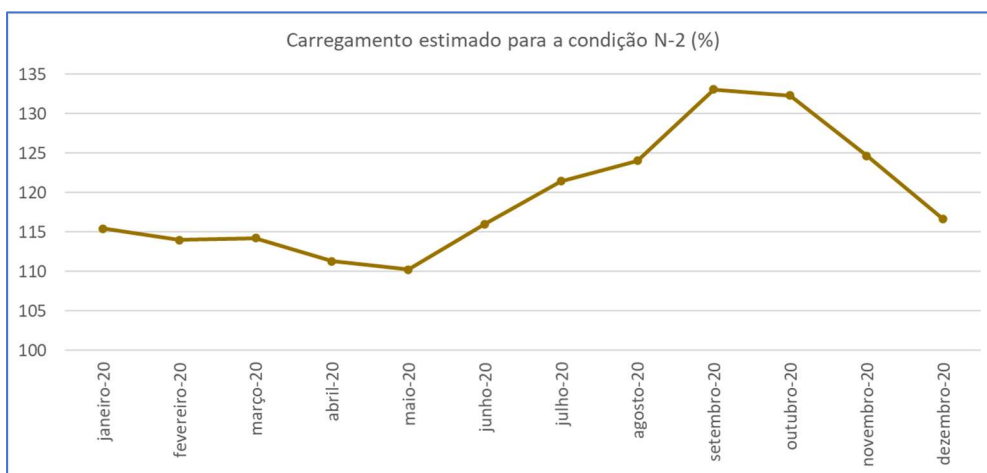


FIGURA 8 – Curva de carga com base de tempo mensal obtida pelo INFO_SUPERVISAO – carregamento estimado para a condição N-2

Observa-se, pela Figura 8, que os meses mais propícios para a realização de intervenções são os meses de abril e maio. Ao contrário, os meses de setembro e outubro são pouco indicados, tendo em vista que a condição N-2 poderia acarretar sobrecargas inadmissíveis nos transformadores remanescentes.

Naturalmente, o planejamento de intervenções envolve diversas variáveis além das condições de carga/sistêmicas, tais como condições climáticas, logística, disponibilidade de materiais e equipes, etc. Porém, o INFO_SUPERVISAO pode proporcionar insumos relevantes para a realização desse planejamento.

4.0 CONCLUSÃO

O mérito do INFO_SUPERVISAO está na automatização do processo de cálculo dos carregamentos máximos diários em cada instalação nas condições N e N-1, com a possibilidade de emitir relatórios personalizados, permitindo à Eletronorte uma gestão mais eficiente dos carregamentos dos seus ativos. Antes da implementação do programa, esse processo era realizado manualmente com o uso de planilhas Excel, o que refletia em elevado custo de homem-hora e obtenção tardia de diagnósticos, prejudicando a atuação das equipes para a correção em tempo hábil de problemas no sistema elétrico da Eletronorte.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, “Submódulo 23.3 - Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos”, 2016. [Online <http://www.ons.org.br/>].

6.0 DADOS BIOGRÁFICOS



João Paulo Fernandes Lima, natural de Goiânia-GO, graduou-se em engenharia elétrica em 2003 pela Universidade Federal de Goiás, tendo recebido o título de mestre pela mesma instituição em 2005. É engenheiro de operação da Eletrobras Eletronorte desde 2011, com atuação na área de estudos elétricos da operação de sistemas. Atualmente, desenvolve estudos operacionais e para os sistemas elétricos da empresa, contemplando as análises de fluxo de potência, estabilidade eletromecânica, curto-circuito e transitórios eletromagnéticos, com particular interesse em estudos de energização de transformadores.



Rodolfo Moacir Seabra Junior, natural de Macapá-AP, graduou-se em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Pará, onde especializou-se em desenvolvimento de aplicações para internet. Analista de Sistemas na Eletronorte desde 2001, desenvolveu projetos como o Sistema Integrado de Gestão do Centro de Tecnologia (SIGLacen) e o Sistema Web de Comparação Interlaboratorial (PCI_Energia/PCI_Eletricidade/PCI_Potência) para empresas do Setor Elétrico Brasileiro. Na Superintendência da Operação, desenvolveu diversos sistemas integrados de apoio à operação (Info_Suíte) e conduziu a implantação de metodologias ágeis para gerenciamento de projetos. Atualmente é gestor do Departamento de Governança de TI na Eletronorte.