



# Estimación de la demanda en sistemas eléctricos de baja tensión en condiciones de desbalance

Davel Borges  
Alfredo González  
Vicente León

Recibido: Octubre del 2007  
Aprobado: Diciembre del 2007

## Resumen / Abstract

En el trabajo se presentan las consideraciones generales de las asimetrías en los sistemas eléctricos de baja tensión, las causas que la provocan, así como los efectos indeseables que ocasionan. A partir de las investigaciones actuales es posible modelar la asimetría como una componente de potencia no activa. Este concepto aplicado a un método propuesto por los autores para la estimación de la demanda durante la etapa de proyecto de los sistemas, posibilita una mayor exactitud en la determinación de la misma, lo cual es presentado a manera de ejemplo en una aplicación práctica.

Palabras clave: Potencia de asimetría, asimetrías, desbalances de los sistemas eléctricos, estimación de la demanda en sistemas eléctricos

In the paper the general considerations of the unbalanced are presented in the electric systems of low tension, the causes that provoke it, as well as the undesirable effects that cause. Starting from the current investigations it is possible to model the unbalanced like a component of power doesn't activate. This concept applied to a method proposed by the authors for the estimate of the demand during the stage of project of the systems, facilitates a bigger accuracy in the determination of the same one, that which is presented by way of example in a practical application.

Key words: Unbalanced power, unbalanced electrical systems, demand estimate in unbalanced systems

## INTRODUCCIÓN

La falta de simetría es una de las ineficiencias más importantes que pueden presentar los sistemas eléctricos. A pesar de ello y hasta el momento, esta ineficiencia no ha suscitado demasiada preocupación, al considerarse que las técnicas de corrección hoy en día utilizadas son suficientes para limitar sus efectos a valores no peligrosos. Estas suposiciones no siempre se cumplen y los efectos de las asimetrías pueden llegar a ser tan graves, en ocasiones, como para dejar fuera de servicio a buena parte de la red eléctrica.<sup>1</sup>

Un sistema eléctrico es simétrico cuando lo son sus generadores, líneas y receptores. Un generador o un

receptor activo (motor) trifásico es balanceado cuando sus fem tienen el mismo valor eficaz y están desfasadas  $120^\circ$  entre sí, y las impedancias de sus bobinas son exactamente iguales. Las líneas de transporte o distribución y los receptores pasivos son simétricos o balanceados cuando cada una de sus fases es igual a las demás. En rigor, no existe ningún sistema eléctrico que verifique todas estas condiciones, ya que no existen en la naturaleza dos elementos que sean exactamente iguales y estas diferencias son incrementadas en los procesos de fabricación; por tanto, todos los sistemas eléctricos son, en mayor o menor medida, desbalanceados o asimétricos, siendo los receptores eléctricos los

causantes mayoritariamente de las ineficiencias por asimetría.<sup>1</sup> Esto da la medida de la necesidad de considerar los efectos de las asimetrías a la hora de estimar la demanda eléctrica como parte de la realización de un proyecto de sistema eléctrico de baja tensión.

Los métodos actuales que tradicionalmente se utilizan para tales fines no incluyen este importante aspecto, por lo cual los resultados de la carga de cálculo resultan erróneos, lo que se traduce en la elevación de los gastos de inversión y explotación de los sistemas.

## DESARROLLO

### Definiciones. Causas de los desbalances

Las asimetrías presentan dos orígenes definidos:

- Como resultado de la diferencia de tensiones (en módulo o ángulo) en las fuentes generadoras trifásicas de los sistemas eléctricos (asimetría de tensiones).
- Como resultado de la diferencia de corrientes (en módulo o ángulo) en los elementos de transmisión y receptores de los sistemas eléctricos (asimetría de corrientes).

Lo más usual a nivel industrial, es la presencia de una fuente de tensiones simétricas en la entrada, alimentando un sistema trifásico que se compone de receptores trifásicos y monofásicos, estos últimos no siempre uniformemente distribuidos en las fases del sistema, por lo que se pueden presentar desbalances de corrientes como resultado del desbalance de cargas. Sin embargo, el hecho de que circulen corrientes de diferente valor por fase, provoca que haya desiguales caídas de tensión en estas y, por tanto, desiguales tensiones en los receptores. Es decir, el desbalance de cargas (o corrientes) conduce, necesariamente, a una asimetría en las tensiones de los receptores.

Las causas de los desbalances pueden ser varias e incluso combinarse. Entre las fundamentales se encuentran:<sup>2</sup>

1. Conexión de cargas monofásicas en redes trifásicas.
2. Bancos de transformadores en estrella y delta abierta alimentando cargas apartadas.
3. Operación bajo falla de equipos de corrección del factor de potencia.
4. Impedancias asimétricas en las redes de alimentación.
5. Falta de fase en algunos puntos del sistema.
6. Fallas monofásicas a tierra no identificadas.
7. Desperfectos en los empalmes, uniones y contactos.
8. Transposición incompleta de las líneas de transmisión.
9. Fuente de suministro inestable o desbalanceada.

### Efectos de las asimetrías en los sistemas eléctricos

Las asimetrías en los sistemas eléctricos industriales son perjudiciales y en forma general pueden ocasionar:<sup>2</sup>

1. Aumento de las pérdidas de potencia y energía eléctrica activa en los elementos del sistema y, por ende, el costo de la energía eléctrica: Esto se debe a la circulación de una componente de corriente cuyo valor eficaz ocasiona pérdidas en los elementos del sistema por efecto Joule.
2. Incremento del calentamiento de todos los elementos de la red eléctrica industrial: Como resultado de lo anterior, se producen calentamientos innecesarios en el sistema.
3. Aumento de las caídas de tensión: Las corrientes no activas de asimetría que circulan por los elementos del sistema (principalmente líneas y transformadores) incrementan las caídas de tensión y, por ende, disminuye la tensión en los receptores eléctricos.
4. Limitación de la capacidad de los elementos del sistema eléctrico hasta llegar a los receptores: La capacidad del sistema se ve limitada por la presencia de las potencias no activas y sus corrientes asociadas, sin que ello contribuya a la transferencia de energía útil.
5. Sobredimensionamiento de los elementos del sistema eléctrico hasta llegar a los receptores: Desde el punto de vista del diseño, los elementos del sistema deben sobredimensionarse para que soporten las potencias y corrientes no activas.
6. Incremento de la posibilidad de averías y encarecimiento de los costos de inversión y explotación del sistema.
7. Aumento de los costos externos de la generación eléctrica: Debido a que la generación en el país es mayoritariamente a través de plantas termoeléctricas, cuyos residuos son altamente contaminantes del medio ambiente.

Adicionalmente, se pueden presentar en los receptores efectos indeseables que afectan el funcionamiento y la vida útil de los mismos.

### Modelación de los desbalances en los sistemas eléctricos lineales

Tradicionalmente la potencia aparente en sistemas eléctricos lineales desbalanceados ha sido considerada a partir de dos corrientes principales:

- Según la teoría de Steinmetz:<sup>3</sup> Como la potencia fasorial, en la cual intervienen las potencias activas y reactivas diferentes de cada fase:

$$S = \sqrt{\left(\sum_z P_z\right)^2 + \left(\sum_z Q_z\right)^2} = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2} \quad \dots(1)$$

- Según la teoría de Budeanu:<sup>4</sup> Como la potencia aritmética suma de las potencias aparentes de cada una de las fases:

$$S = \sum_z S_z = S_a + S_b + S_c \quad \dots(2)$$

Ambas consideraciones resultan erróneas y por lo tanto inexactas, a la luz de las investigaciones actuales.

Los efectos del desbalance en sistemas eléctricos lineales pueden ser modelados a partir de la consideración de una potencia de asimetría con cualidades propias, que se suma ortogonalmente a las potencias activa y reactiva, formando un tetraedro de potencias tal y como se muestra en la figura 1.

Matemáticamente esto puede ser expresado como:<sup>5</sup>

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + A^2} \quad \dots(3)$$

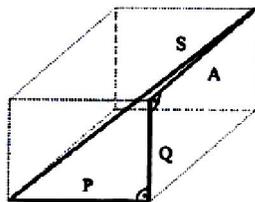
donde:

S : Potencia aparente efectiva.

P : Potencia activa de secuencia positiva.

Q : Potencia reactiva de secuencia positiva.

A : Potencia de desbalance.



Tetraedro de potencias

1

### Estimación de la demanda eléctrica en sistemas de baja tensión, considerando los efectos del desbalance de corriente

Cuando se proyectan sistemas eléctricos de baja tensión, no siempre resulta posible lograr un desbalance de corrientes admisible como resultado de un reparto equitativo de los receptores monofásicos en el sistema trifásico. Cuando los desbalances exceden los valores permisibles, la estimación de la demanda por métodos convencionales (a partir de la potencia aparente

geométrica del modelo de Steinmetz o de la potencia aparente aritmética del modelo de Budeanu) no logra los resultados esperados.

Resulta entonces indispensable el uso de las definiciones actuales de la potencia eléctrica y su adaptación a la estimación de la demanda eléctrica.

Precisamente, se propone un método basado en estas definiciones, para estimar la demanda eléctrica de un grupo de receptores, con desbalances de corrientes, que consta de los siguientes pasos:

1. Determinar las potencias activas de cálculo de cada fase ( $P_{ca}$ ,  $P_{cb}$  y  $P_{cc}$ ):

$$\begin{aligned}
 P_{ca} &= \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{n3\phi} pn3\phi_{(i)} \cdot Kda_{(i)} + \sum_{i=1}^{nao} pnao_{(i)} \cdot Kda_{(i)} + \sum_{i=1}^{nab} pnab_{(i)} \cdot Kp[ab]a_{(i)} \cdot Kda_{(i)} + \sum_{i=1}^{nac} pnac_{(i)} \cdot \\
 &\cdot Kp[ac]a_{(i)} \cdot Kda_{(i)} \\
 P_{cb} &= \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{n3\phi} pn3\phi_{(i)} \cdot Kda_{(i)} + \sum_{i=1}^{nbo} pnbo_{(i)} \cdot Kda_{(i)} + \sum_{i=1}^{nab} pnab_{(i)} \cdot Kp[ab]b_{(i)} \cdot Kda_{(i)} + \\
 &+ \sum_{i=1}^{nbc} pnbc_{(i)} \cdot Kp[bc]b_{(i)} \cdot Kda_{(i)} \\
 P_{cc} &= \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{n3\phi} pn3\phi_{(i)} \cdot Kda_{(i)} + \sum_{i=1}^{nco} pnco_{(i)} \cdot Kda_{(i)} + \sum_{i=1}^{nbc} pnbc_{(i)} \cdot Kp[bc]c \cdot \\
 &\cdot Kda_{(i)} + \sum_{i=1}^{nca} pnca_{(i)} \cdot Kp[ca]c_{(i)} \cdot Kda_{(i)} \quad \dots (4)
 \end{aligned}$$

donde:

$pn3\phi_{(i)}$  : Potencia activa nominal de los receptores trifásicos conectados al sistema.

$pnxy_{(i)}$  : Potencia activa nominal de los receptores monofásicos conectados a las fases x, y del sistema.

$Kda_{(i)}$  : Coeficiente de demanda de potencia activa de los receptores.

$Kp[xy]x_{(i)}$  : Coeficiente de referencia de potencia activa de los receptores conectados a las fases x, y referido a la fase x.

2. Determinar las potencias reactivas de cálculo de cada fase ( $Q_{ca}$ ,  $Q_{cb}$ ,  $Q_{cc}$ ):

$$\begin{aligned}
 Q_{ca} &= \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n3\phi} qc3\phi_{(i)} + \sum_{i=1}^{nao} qcnao_{(i)} + \sum_{i=1}^{nab} qcab_{(i)} * Kq[ab]a_{(i)} + \sum_{i=1}^{nac} qcac_{(i)} * Kq[ac]a_{(i)} \\
 Q_{cb} &= \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n3\phi} qc3\phi_{(i)} + \sum_{i=1}^{nbo} qcnb_{(i)} + \sum_{i=1}^{nbc} qcnc_{(i)} * Kq[bc]b_{(i)} + \sum_{i=1}^{nabc} qcnc_{(i)} * Kq[ab]b_{(i)} \\
 Q_{cc} &= \frac{1}{3} * \sum_{i=1}^{n3\phi} qc3\phi_{(i)} + \sum_{i=1}^{nco} qcnc_{(i)} + \sum_{i=1}^{nbc} qcnc_{(i)} * Kq[bc]c_{(i)} + \sum_{i=1}^{nac} qcnc_{(i)} * Kq[ac]c_{(i)} \quad \dots (5)
 \end{aligned}$$

donde:

$qc3\phi_{(i)}$  : Potencia reactiva de cálculo de los receptores trifásicos conectados al sistema.

$qcxy_{(i)}$  : Potencia reactiva de cálculo de los receptores monofásicos conectados a las fases x, y del sistema.

$Kq[xy]x_{(i)}$  : Coeficiente de referencia de potencia reactiva de los receptores conectados a las fases x, y referido a la fase x.

Las potencias reactivas de cálculo de los receptores individuales pueden ser obtenidas a partir de su potencia activa de cálculo y la tangente del ángulo correspondiente al factor de potencia del receptor.

3. Determinar la potencia de asimetría de cálculo de cada fase.

La potencia de asimetría de cálculo ( $A_c$ ) puede determinarse como:

$$A_c = \sqrt{(P_{ca} - P_{cb})^2 + (P_{cb} - P_{cc})^2 + (P_{cc} - P_{ca})^2 + (Q_{ca} - Q_{cb})^2 + (Q_{cb} - Q_{cc})^2 + (Q_{cc} - Q_{ca})^2} \quad \dots(6)$$

4. Determinar la carga de cálculo del grupo de receptores:

La carga de cálculo del grupo de receptores (potencia activa, reactiva, aparente, corriente y factor de potencia, respectivamente) puede determinarse a partir de las expresiones siguientes:

$$P_c = P_{ca} + P_{cb} + P_{cc}$$

$$Q_c = Q_{ca} + Q_{cb} + Q_{cc}$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2 + A_c^2}$$

$$I_c = \frac{S_c \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_c}{S_c} \quad \dots(7)$$

#### Ejemplo de estimación de la demanda eléctrica a partir de la metodología propuesta

A manera de ejemplo se seleccionó el proyecto eléctrico de la pizarra general de distribución (PGD) de la sala operativa del Combinado Cárnico de la provincia de Camagüey. La PGD se compone de dos pizarras: fuerza (PF) y alumbrado (PA), cuyo diagrama monolineal con los datos de los receptores se muestra en el anexo.

Se realizó la estimación de la demanda eléctrica a partir del método de la potencia media, el coeficiente de máximo  $K_m$  y el de no coincidencia de máximo  $K_{nc}$  (representado en la tabla 1 como tradicional) que es uno de los más utilizados en las empresas de proyectos para este tipo de aplicación y que utiliza el modelo de potencia aparente de Steinmetz, así como a partir del método propuesto por los autores, que considera el efecto de la potencia de asimetría, según las definiciones actuales de la potencia eléctrica.

En cada caso, se obtuvieron los valores de la carga de cálculo en la pizarra de fuerza (PF), alumbrado (PA) y a nivel general (PGD), lo cual se presenta en la tabla 1.

Tabla 1 Resultados obtenidos por ambos métodos							
Método	Grupo	$P_c$ (KW)	$Q_c$ (KVAr)	$A_c$ (VAa)	$S_c$ (KVA)	$I_c$ (A)	$\cos \varphi_c$
Tradicional	PF	33,40	28,50	-	43,90	115,00	0,76
	PA	13,38	8,64	-	15,90	41,70	0,84
	PGD	51,64	36,78	-	63,40	166,00	0,81
Propuesto	PF	31,04	23,1	3,3	38,83	102	0,8
	PA	7,8	1,8	6,8	10,5	27,6	0,74
	PGD	38,79	24,92	10,1	47,2	123,9	0,82

## CONCLUSIONES

La no consideración de la potencia de asimetría en las expresiones de estimación de la demanda trae aparejado errores en los resultados que se traducen en el incremento de las inversiones. En sistemas desbalanceados, la carga de cálculo a partir del método propuesto es menor, a pesar de considerar el efecto de la potencia de asimetría y de que todos los receptores operaban de forma simultánea. Si se acepta que la experiencia práctica plantea que los métodos tradicionales tienden a la sobreestimación para este tipo de sistemas, entonces se puede asegurar que el resultado del método propuesto puede tener una mayor exactitud en la determinación de la carga de cálculo.

La variación de los factores de asimetría en la aplicación no traen diferencias sustanciales en los resultados de la carga de cálculo por el método propuesto, aunque es conocido por la literatura que los métodos tradicionales se vuelven más inexactos, aumentando los valores de la carga de cálculo, en la medida en que se incrementa el grado de asimetría.

## REFERENCIAS

1. **León Martínez, Vicente**: "Método integral para la mejora de la eficiencia y la calidad en el suministro de la energía eléctrica en baja tensión", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1997.
2. -----: Eficiencia en los sistemas eléctricos. Efectos, cuantificación y dispositivos de mejora de la eficiencia, Editorial Universidad Politécnica de Valencia, España, 2001.
3. **Steinmetz, C P.**: Theory of Alternating Current Phenomena, McGraw-Hill, EEUU, 1897.
4. **Czarnecky, L. S.**: What is Wrong with Budeanu Concept of Reactive and Distorsion Power why if Should be Abandoned, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 36, No. 3, pp. 834-837, 1987.
5. "IEEE Trial-Use Standard Definitions of the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions", IEEE Std 1459-2000 ,Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

## AUTORES

### **Davel Borges Vasconcellos**

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba  
e-mail:davel.borges@reduc.edu.cu

### **Alfredo González Digón**

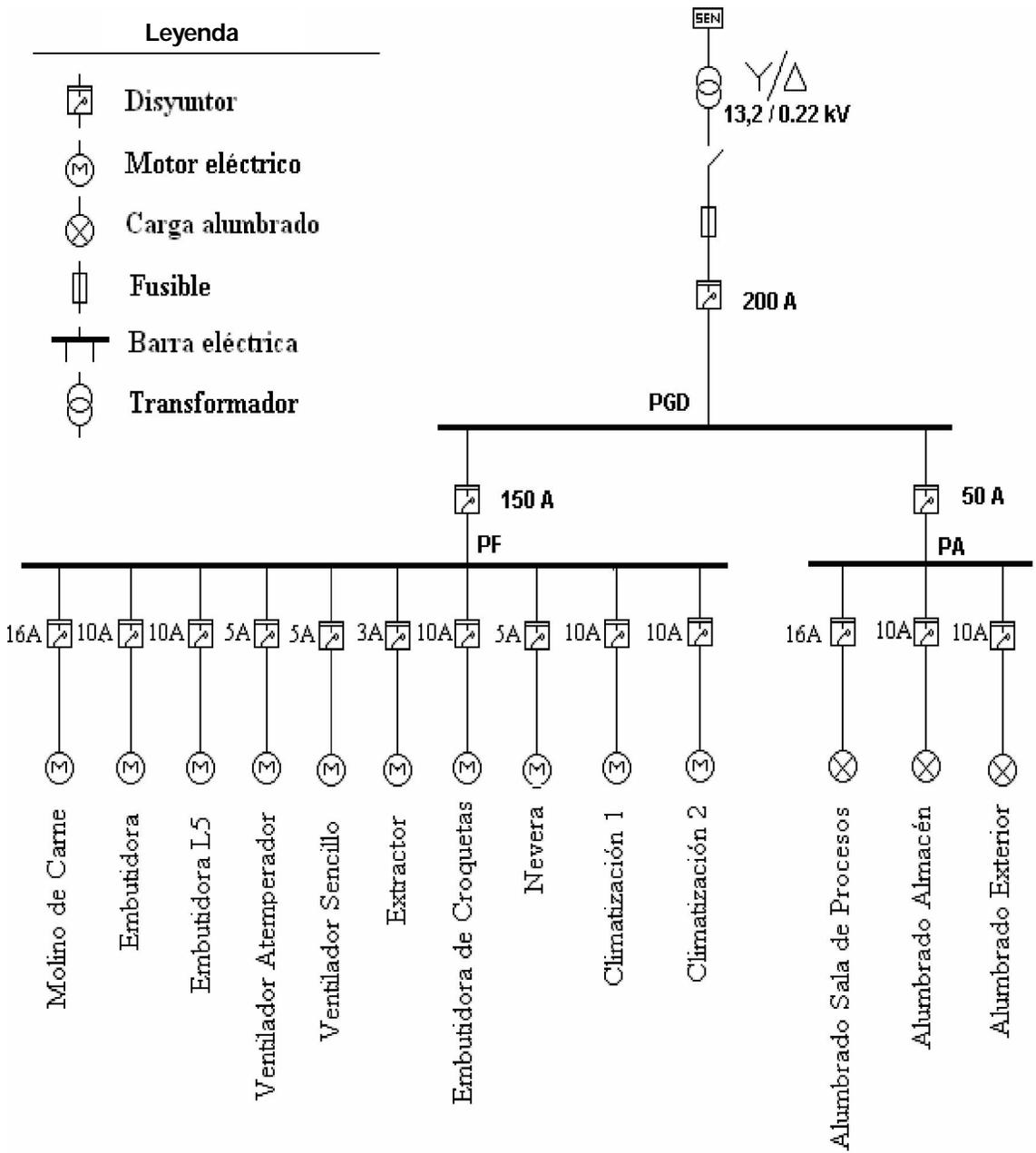
Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba  
e-mail:alfredo.digon@reduc.edu.cu

### **Vicente León Martínez**

Ingeniero Técnico Electricista, Ingeniero Superior Industrial, Doctor Ingeniero Industrial, Catedrático, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, España  
e-mail:vleon@die.upv.es

ANEXOS

Diagrama de ejemplo de aplicación



Datos de los receptores						
Descripción	Kua(pu)	Kda(pu)	Cos $\varphi$ n(pu)	Pn(kW)	Un(V)	Fases
Molino de carne	0,7	0,8	0,81	4	220	ABC
Embutidora	0,65	0,9	0,8	4,5	220	ABC
Embutidora L-5	0,65	0,9	0,8	4,5	220	ABC
Ventilador atemperador	0,7	0,8	0,81	4	220	ABC
Ventilador sencillo	0,7	0,8	0,76	3	220	ABC
Extractor	0,7	0,8	0,73	2,2	220	ABC
Embutidora de croquetas	0,65	0,9	0,81	7,5	220	ABC
Nevera	0,69	0,8	0,83	3	220	ABC
Climatización 1	0,69	0,8	0,83	2	220	AB
Climatización 2	0,69	0,8	0,83	2	220	AB
Alumbrado sala de procesos	0,8	0,9	0,9	3,7	220	AB
Alumbrado de almacén	0,8	0,9	0,9	2,5	220	AB
Alumbrado exterior	0,8	0,9	0,9	2,5	220	AB